

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie

zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

**Hodnocení vlivu rychlosti deformace na mechanické vlastnosti
technických materiálů**

**Research about influence of the deformation rate on the mechanical
features of technical materials**

Daniel Slavík

KSP – TP – B

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 46

Počet tabulek: 9

Počet příloh: 7

Počet obrázků: 36

Datum: 24. 5. 2013

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Student: Daniel Slavík

Téma práce: Hodnocení vlivu rychlosti deformace na mechanické vlastnosti technických materiálů

Research about influence of the deformation rate on the mechanical features of technical materials

Číslo BP: KSP – TP – B

Vedoucí BP: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. - *TU v Liberci*

Konzultant BP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. - *TU v Liberci*

Abstrakt:

Předkládaná bakalářská práce se zabývá vlivem rychlosti deformace na mechanické vlastnosti technických materiálů.

Teoretická část obsahuje základní informace o mechanických vlastnostech materiálů, jejich zkoušení a vlivu rychlosti deformace.

Výsledkem experimentální části je vyhodnocení vlivu rychlosti deformace na mechanické vlastnosti materiálu a odzkoušení nového zkušebního zařízení, kterým v současné době disponuje Technická univerzita v Liberci.

Abstract:

The bachelor work deals with influence of deformation rate on mechanical features of technical materials.

Theoretic part contains basic information about mechanical features of materials, their verification and influence of the deformation rate.

The outcom of experimental part evaluates the influence of the deformation rate on mechanical features of materials and it is also testing a new mechanical device, which has been nowadays a property of Technical university of Liberec.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. května 2013

.....
Daniel Slavík
Radechovská 1318
294 21 Bělá pod Bezdězem

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Pavlu Doubkovi, Ph.D. za jeho cenné rady a velmi vstřícný přístup.



OBSAH

1. ÚVOD	10
2. TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1 Základní vlastnosti materiálu	11
2.1.1 Zkoušky mechanických vlastností	11
2.1.1.1 Zkouška tahem.....	12
2.1.1.2 Impact test	14
2.1.1.3 Vypínání pevným nástrojem	15
2.2 Význam a využití dynamických testů v praxi	17
2.2.1 Bariérové zkoušky.....	17
2.2.1.1 Crash Test – Škoda Octavia III.....	19
2.3 Deformační chování materiálu.....	21
2.3.1 Elastická a plastická deformace	21
2.3.1.1 Elastická deformace	21
2.3.1.2 Plastická deformace	22
2.4 Tváření vysokou rychlostí deformace	23
2.4.1 Princip	23
2.4.2 Oblast využití	23
2.4.3 Diagramy mezních přetvoření.....	24
2.4.4 Vliv rychlosti deformace na Diagram mezních přetvoření.....	25
2.4.4.1 Definice rychlosti deformace.....	25
2.4.4.2 Vliv rychlosti deformace na vlastnosti materiálu	25
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	27
3.1 Cíle bakalářské práce	27
3.1.1 Testovaný materiál.....	27
3.2 Ověření mechanických vlastností zkoušeného materiálu	28
3.2.1 Příprava vzorků	28
3.2.2 Průběh zkoušky.....	29
3.2.3 Vyhodnocení zkoušky.....	30
3.3 Vypínání vzorků vysokou rychlostí	32
3.3.1 INSTRON – CEAST 9350	32
3.3.1.1 Software CeastVIEW 6.01	33



3.3.2	Příprava vzorků	34
3.3.3	Průběh zkoušky.....	34
3.3.4	Vyhodnocení zkoušky.....	35
4.	HODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ	42
5.	ZÁVĚR.....	43
6.	POUŽITÁ LITERATURA.....	44
7.	SEZNAM PŘÍLOH	46

Seznam použitých zkratk a symbolů

a_0	[mm]	Počáteční tloušťka zkušebního vzorku
b_0	[mm]	Počáteční šířka zkušebního vzorku
a	[mm]	Tloušťka vzorku po přetržení
b	[mm]	Šířka vzorku po přetržení
d_0	[mm]	Počáteční průměr zkušebního vzorku
d	[mm]	Průměr vzorku po přetržení
L_0	[mm]	Počáteční délka zkušebního vzorku
L_u	[mm]	Délka vzorku po přetržení
ΔL	[mm]	Hodnota prodloužení zkušebního vzorku
S_0	[mm ²]	Počáteční hodnota příčného průřezu zkušebního vzorku
t	[mm]	Tloušťka materiálu
F_m	[N]	Maximální zatížení zkušebního vzorku
F_{eL}	[N]	Zatížení na dolní mezi kluzu
F_{eH}	[N]	Zatížení na horní mezi kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	[MPa]	Mez kluzu v tahu
R_{eL}	[MPa]	Dolní mez kluzu v tahu
R_{eH}	[MPa]	Horní mez kluzu v tahu
ε	[-]	Poměrné prodloužení vzorku
A_{80mm}	[mm]	Tažnost vzorku délky 80 mm
E	[MPa]	Yongův modul pružnosti v tahu
σ	[MPa]	Napětí
$\varphi_{1,2,3}$	[-]	Logaritmická deformace
φ	[-]	Logaritmické přetvoření
m_φ	[-]	Ukazatel stavu přetvoření
c	[m/s]	Rychlost deformace



C	[%]	Uhlík
Mn	[%]	Mangan
P	[%]	Fosfor
S	[%]	Síra



1. ÚVOD

Současné požadavky na kvalitu nutí výrobce k vývoji stále dokonalejších materiálů. Příkladem může být automobilový průmysl, respektive materiály pro konstrukci karoserie automobilu a snaha konstruktérů vyrábět ekologičtější, bezpečnější a levnější automobily s nižší hmotností a spotřebou pohonných hmot.

Jako příklad si lze uvést průběh Crash Testu, kde je snaha o zvýšení pasivní bezpečnosti automobilu (zvýšení tuhosti karoserie). Jedná se o bariérovou zkoušku prováděnou z důvodu ověření bezpečnosti posádky automobilu při havárii. Samozřejmě je kladen důraz i na ochranu chodců při eventuální srážce automobilu s chodcem. Při těchto zkouškách je tedy testována nejen odolnost karosérie či jejich dílů proti různým typům nárazu v různé rychlosti, ale i ochrana posádky či chodců.

Cílem práce je vyzkoušet funkci nového zařízení CEAST 9350 na TUL Katedře strojírenské technologie, což je dynamický padostroj pro hodnocení vlastností a chování materiálů při vyšších zatěžovacích rychlostech. Pro zjištění vlivu rychlosti deformace bude zkoušce vypínání polokulovým tažníkem podroben materiál DC 05 + ZE 50/50 – BPO. Tento materiál patří mezi hlubokotažné oceli, ze kterých bývá vyráběna právě karoserie automobilu. Z průběhu velikosti síly při vypínání bude možné sledovat chování zkušebních vzorků při dynamickém zatížení.

Experimentální část se tedy bude z velké části věnovat vysokorychlostnímu zařízení CEAST 9350 od firmy INSTRON a softwaru pro vyhodnocování dat měření CeastVIEW 6.01.

Výsledkem experimentální části bude vyhodnocení vlivu rychlosti deformace na mechanické vlastnosti materiálu a deformaci vzorků. Nedílnou součástí práce bude ověření funkčnosti a základních možností popisovaného zařízení včetně vyhodnocení získaných dat a možnosti jejich dalšího využití.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Základní vlastnosti materiálu

Základní informace o tom jakým způsobem se materiál bude chovat při výrobě, montáži, nebo při zatěžování v provozním cyklu nám říkají jeho vlastnosti. Základní vlastnosti materiálu se rozdělují na:

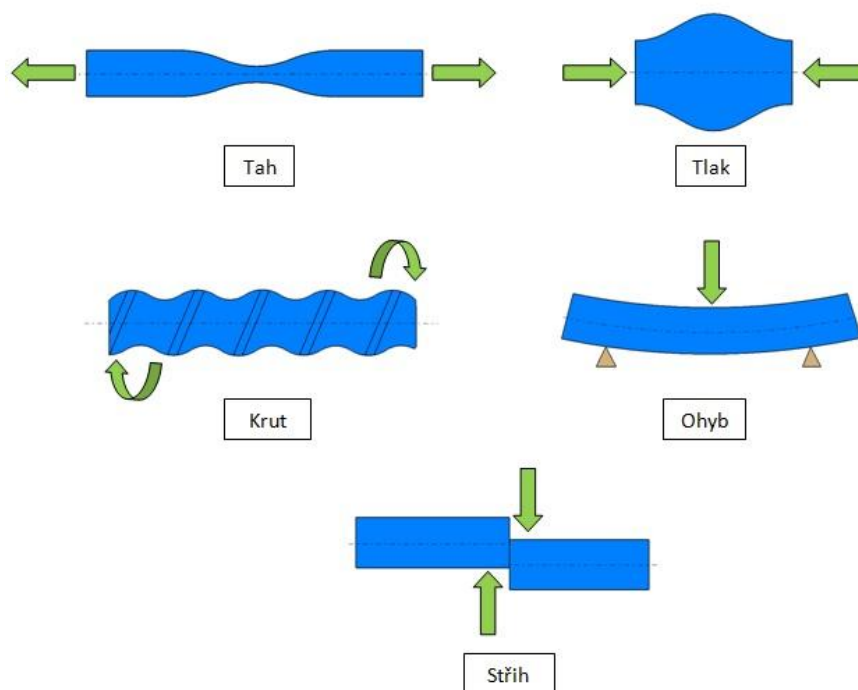
- Fyzikální – charakterizují chování materiálu při fyzikálních změnách, např.: tepelná vodivost
- Chemické – charakterizují chování materiálu při chemických změnách, např.: koroze
- Mechanické – charakterizují chování materiálu při mechanickém namáhání vnějšími silami, např.: pevnost
- Technologické – charakterizují chování materiálu při daném technologickém zpracování, např.: slévatelnost

Základní tyto vlastnosti lze pomocí odpovídajících zkoušek. Vlastnosti jsou sledovány provozními nebo laboratorními zkouškami. Tím se stanoví, zda materiál dosahuje požadovaných vlastností pro jeho určité použití. Mechanické vlastnosti lze stanovit působením statického, dynamického a cyklického zatěžování materiálu. Získané hodnoty požadovaných vlastností materiálu lze porovnat s nutnými a požadovanými hodnotami v technické praxi.

Vlastnosti materiálu jsou uváděny v technicko-dodavatelských předpisech, DIN, EN, ISO, ČSN normách sjednocujících podmínky mezi výrobcem, dodavatelem a odběratelem. [1]

2.1.1 Zkoušky mechanických vlastností

Při zpracování i při použití jsou materiály vystaveny různému namáhání, jako je tah, tlak, krut, střih a ohyb (obr. 2.1.1). Tato namáhání obvykle nepůsobí samostatně, ale naopak působí většinou současně jako kombinace dvou i více prostých namáhání (např.: tah a ohyb). Aby mohl materiál odolávat takovému namáhání, musí mít určité vlastnosti, jako jsou pevnost, tvrdost, pružnost, tvárnost aj. Při určitých teplotách se mění krystalická struktura materiálu a tím se mění i jejich mechanické vlastnosti. [2]



Obr. 2.1.1: Druhy namáhání materiálu

Zkoušky mechanických vlastností lze dle způsobu zatížení dělit na:

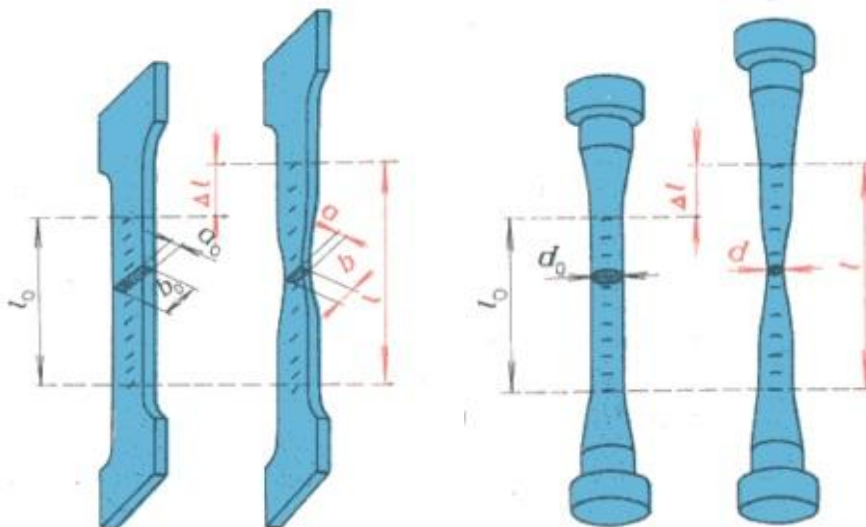
- Statické** – zkušební vzorek je namáhán vnější klidovou silou nebo silou plynule se měnící. Tato síla vyvolává změny tvaru vzorku (deformace) až do jeho porušení. Jedná se tedy o zkoušky destruktivní, kdy je materiál znehodnocen.
- Dynamické** – na zkušební vzorek je působeno rázovou silou nebo opakujícím se zatěžováním a odlehčováním zkušebního tělíška. Je sledován počet cyklů odlehčení a zatížení při určitém charakteru namáhání do vzniku prvních trhlin na zkušebním tělese. Taktéž se jedná o zkoušky destruktivní. [1]

2.1.1.1 Zkouška tahem

Je nejrozšířenější a nejpoužívanější zkouškou pro hodnocení mechanických vlastností technických materiálů. Při této zkoušce jsou poskytnuty základní údaje o tom, jak se kov chová při stavu napjatosti stanovené jednoosým tahem. Touto zkouškou je zjišťována pevnost, celkové prodloužení a zúžení zkušební vzorku (obr. 2.1.2). Někdy je zjišťováno též rovnoměrné prodloužení v první fázi zkoušky. Zkoušku tahem lze také provádět při větších rychlostech deformace, tzv. rázové tahové zkoušky. [4]

Při samotné zkoušce je deformována zkušební tyč jednoosým tahem. V průběhu zkoušky vzniká ve zkušební tyči napětí označováno jako σ . Vlivem tohoto napětí dochází k prodloužení zkušební tyče (poměrné

prodloužení). Zkouška končí přetržením vzorku. Po přetržení zkušební vzorku jsou stanoveny napěťové a deformační charakteristiky (obr. 2.1.3). [5]

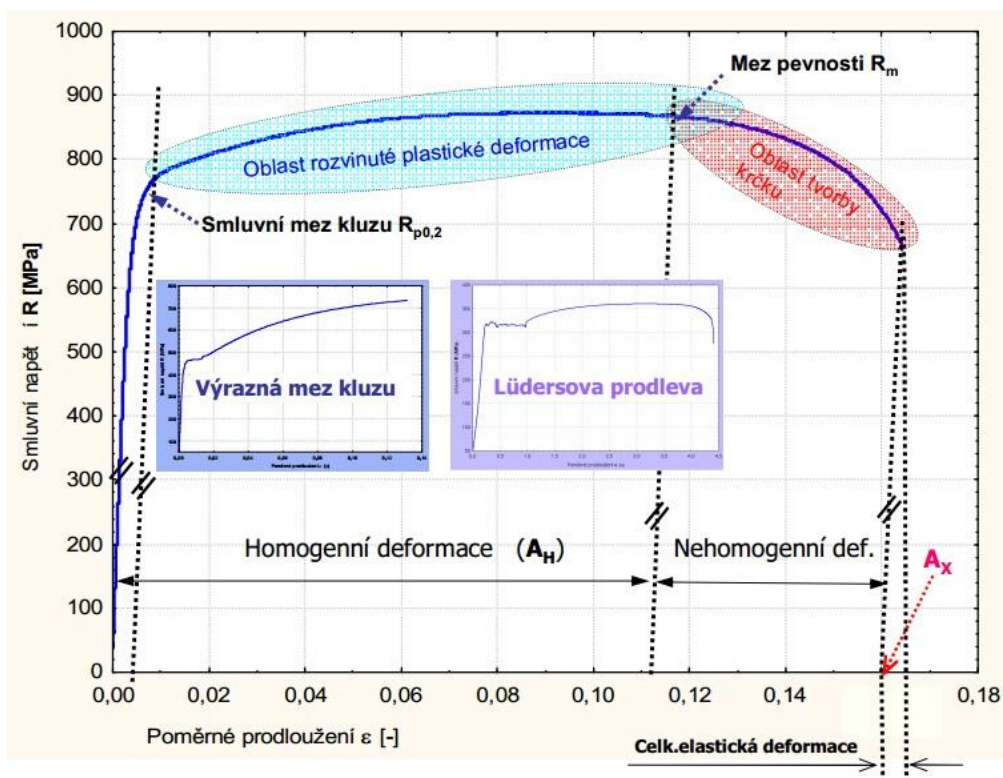


Obr. 2.1.2: Zkušební vzorky pro zkoušku tahem

L_0 – počáteční délka zkušební tyče [mm]

L_u – délka zkušební tyče po přetržení [mm]

S_0 – počáteční průřez zkušební tyče [mm²]



Obr. 2.1.3: Diagram statické zkoušky tahem

R_m [MPa] – pevnost v tahu. Jedná se o mechanické napětí odpovídající největšímu zatížení zkušební tyče F_m vztaženému k počáteční ploše příčného průřezu zkušební tyče S_0 .

Mez pevnosti je dána vztahem: $R_m = \frac{F_m}{S_0}$ (1)

R_{eH} [MPa] – horní mez kluzu. Jedná se o napětí odpovídající prvnímu okamžiku poklesu napětí. Toto napětí stanovíme jako napětí odpovídající zatížení F_{eH} vztažené k počáteční ploše příčného průřezu zkušební tyče S_0 .

Horní mez kluzu je dána vztahem: $R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}$ (2)

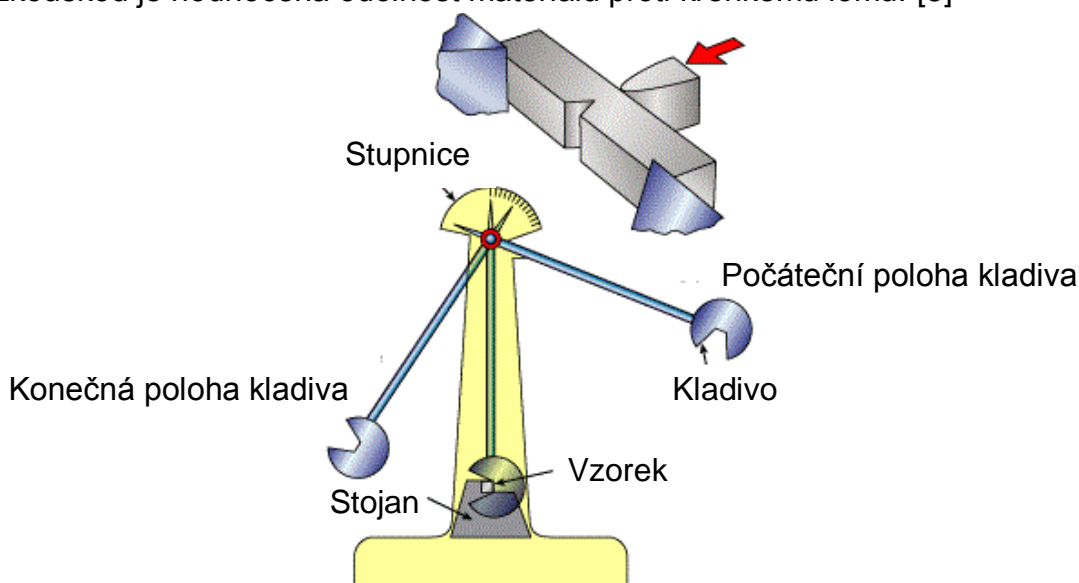
R_{eL} [MPa] – dolní mez kluzu. Jedná se o nejnižší napětí v průběhu plastického kluzu kovu. Toto napětí stanovíme jako napětí odpovídající zatížení F_{eL} vztažené k počáteční ploše příčného průřezu S_0 .

Dolní mez kluzu je dána vztahem: $R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$ (3)

2.1.1.2 Impact test

V technické praxi se často vyskytují strojní součásti namáhány rázovým způsobem zatížení. Tento způsob zatížení může způsobit náhlé porušení materiálu bez předchozí deformace, je tedy velmi nebezpečné pro zatěžované součásti. Existují tři druhy zkoušek rázem – v ohybu, krutu, tahu. Nejvýznamnější je zkouška rázem v ohybu.

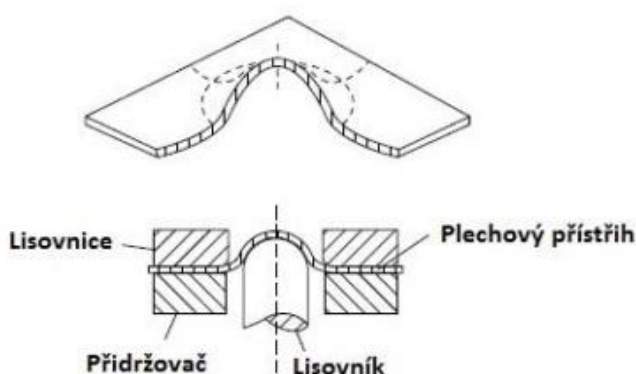
Při zkoušce rázem v ohybu je zjišťován vzhled lomové plochy zkušební tyče a práce potřebné k přeražení tyče – nárazová práce. K provedení zkoušky je využíváno speciálního kyvadlového kladiva (obr. 2.1.4), kterým je přerazena geometricky definována zkušební tyč. Touto zkouškou je hodnocena odolnost materiálu proti křehkému lomu. [5]



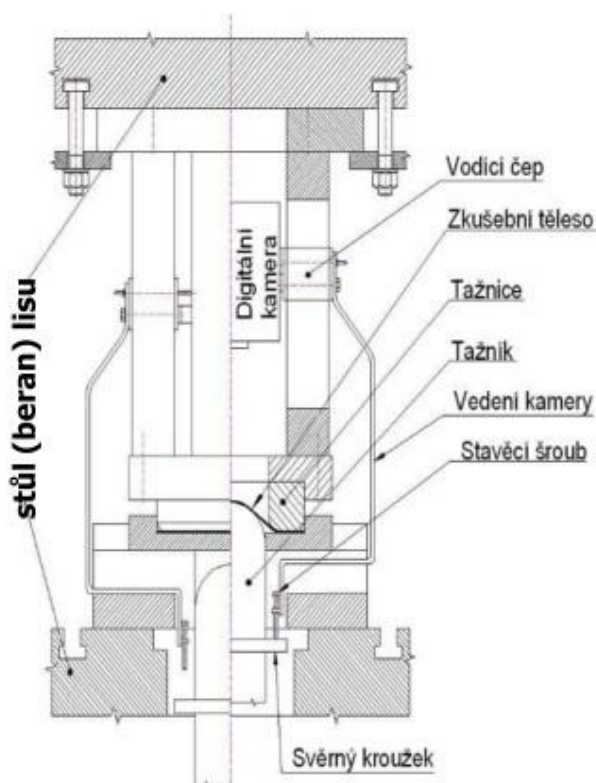
Obr. 2.1.4: Charpyho kyvadlové kladivo

2.1.1.3 Vypínání pevným nástrojem

Při procesu vypínání je tvarovaný plech na okrajích pevně upnut, tak aby nemohlo dojít k prokluzu materiálu v čelistích. Vlastní proces tvarování se provádí vtlačení tažníku do upnutého plechu nebo je naopak plech přetažen kolem nástroje. Rozdílem mezi hlubokým tahem a vypínání je, že při vypínání je vnášena síla přímo do materiálu a k vlastní deformaci a ztenčování plechu dochází převládajícím tahovým napětím. Optimální rovnoměrná deformace při vypínání je podmíněna dobrým mazáním a vhodnou volbou nástroje. Nejjednodušší proces vypínání plechu je zobrazen na obr. 2.1.5. Tažník je v tomto procesu vtlačen do plechu a v jeho centru vznikají tahové síly. Tyto tahové síly způsobují deformaci. Kontaktní napětí mezi lisovnicí a plechem je mnohem nižší než mez kluzu plechu. Materiál na okrajích plechu odolává tažným silám a v tomto místě vzniká obloukové (obvodové) napětí v tlaku. Jelikož v oblasti vně tohoto místa budou vznikat tendence k prohýbání, bude plech držen přidržovačem. Uvedené vlastnosti jsou běžné u mnoha způsobů zpracování plechů – například u těch, u kterých není tváření způsobeno přímým tlakem (v dotyku), ale silami přenášenými plechem (prostřednictvím plechu) a je zde rovnováha (vyváženost) mezi tahovými silami nad lisovnicí a tlakovými silami v materiálu vnější příruby. [8, 9]



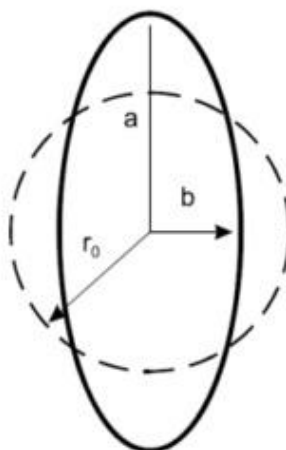
Obr. 2.1.5: Tvar vzorku



Obr. 2.1.6: Schéma nástroje pro vypínání polokulovým tažníkem

Limitní diagramy

Reálný napěťově-deformační stav při tažení nebo vypínání tvarově komplikovaných výtažků nelze postihnout jednoduchými zkouškami. Pro komplikované výtažky (vyráběné ve velkých sériích) je proto účelné použít zkoušek přímých (tok materiálu zkoumán na modelu). Výsledek může být hodnocen kvalitativně (porušil – neporušil) nebo kvantitativně. Nejrozšířenější metoda kvantitativního popisu toku materiálu je metoda sítí (obr. 2.1.7). Hodnocení deformačních sítí je založeno na předpokladu, že se tenký plech poruší v důsledku lokalizace deformace při rovinné napjatosti, kde vzniká největší deformace. [9]



Obr. 2.1.7: Vyjádření deformace kruhové sítě



V případě, že se nemění tloušťka plechu po tváření je logaritmická deformace:

$$\varphi_1 = \ln \frac{a}{r_0}, \varphi_2 = \ln \frac{b}{r_0}, \varphi_3 = 0 \quad (11)$$

V případě, že se mění tloušťka plechu po tváření:

$$\varphi_3 = -\varphi_2 - \varphi_1 \quad (12)$$

2.2 Význam a využití dynamických testů v praxi

2.2.1 Bariérové zkoušky

Chování automobilu při nárazu je hodnoceno pomocí bariérových zkoušek, které jsou nazývány Crash Test. Při těchto zkouškách je testována odolnost karosérie či jejich dílů proti různým typům nárazu a funkčnosti bezpečnostních systémů při čelním, bočním, zadním nárazu nebo při převrácení vozu (roll-over) za předem specifikovaných podmínek. Zároveň s tímto se sleduje a vyhodnocuje chování a porušení jedné nebo několika figurín ve zkoušeném automobilu. Tyto zkoušky jsou uskutečňovány v různých rychlostech, včetně nárazů do částečně deformovaných objektů či simulace střetu automobilu s chodcem. [9]

Mezi základní zkoušky patří:

- 1) *Čelní náraz* rychlostí 64 km/h na pevnou, deformovatelnou překážku ve 40% šířky vozu simulující střet dvou vozidel.
- 2) *Boční náraz*, kdy je kovová bariéra vymrštěna rychlostí 50 km/h do boku vozidla na straně řidiče.
- 3) *Náraz na sloup*, kdy je vozidlo vymrštěno katapultovacím vozíkem na sloup o průměru 25,4 cm rychlostí 29 km/h. [12]

Tyto testy jsou prováděny z důvodu zlepšení bezpečnosti auta při havárii. Jednou z největších společností zabývajících se právě Crash Testy je bezesporu Euro NCAP (European New Cars Assessment Programme). Jedním z cílů této společnosti je zveřejnění výsledků bezpečnosti jednotlivých automobilů. Je tedy snaha provádět testy nejvíce se přibližující skutečným nárazům. Zajímavostí je, že výrobce nemůže do testů zasahovat a neví, který konkrétní kus bude testován. Logicky jsou vybírány nejprodávanější modely své řady.

Na zkoušených vozech a figurínách je umístěna celá řada akcelerometrů měřících zrychlení (může dosahovat až 30 G), dále senzory pohybu a zatížení. Průběh celého testu je natáčen vysokorychlostními kamerami zachycujícími až 1000 fps. Při takové rychlosti natáčení je nutné dobré osvětlení. Z tohoto důvodu je v testovacích prostorech mnoho

reflektorů. Tím pádem musí být auta natřena speciálním matným nátěrem k zamezení odrazu světla od laku karoserie. [11]

Testy prováděné společností Euro NCAP:

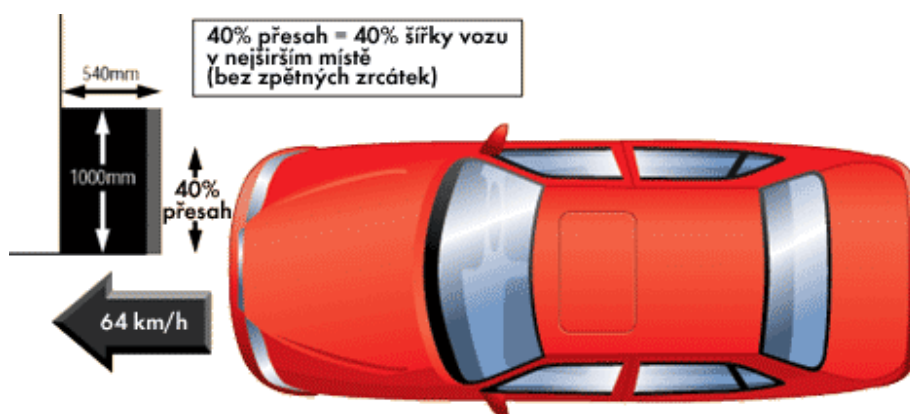
- 1) *Čelní nárazová zkouška* prováděna v rychlosti 64 km/h nebo 56 km/h (podle normy) nárazem vozu do deformovatelné bariéry (obr. 2.2.1)
- 2) *Boční nárazová zkouška* v rychlosti 50 km/h (obr. 2.2.2)
- 3) *Boční nárazová zkouška* do stromu v rychlosti 29 km/h
- 4) *Náraz do chodce* (dítěte, dospělé osoby) v rychlosti 40 km/h

Bodové ohodnocení vozu dle Euro NCAP:

- 33 – 40 bodů → ★★★★★
- 25 – 32 bodů → ★★★★★
- 17 – 24 bodů → ★★★★★
- 09 – 16 bodů → ★★
- 01 – 08 bodů → ★

Popis čelního nárazu prováděného společností Euro NCAP:

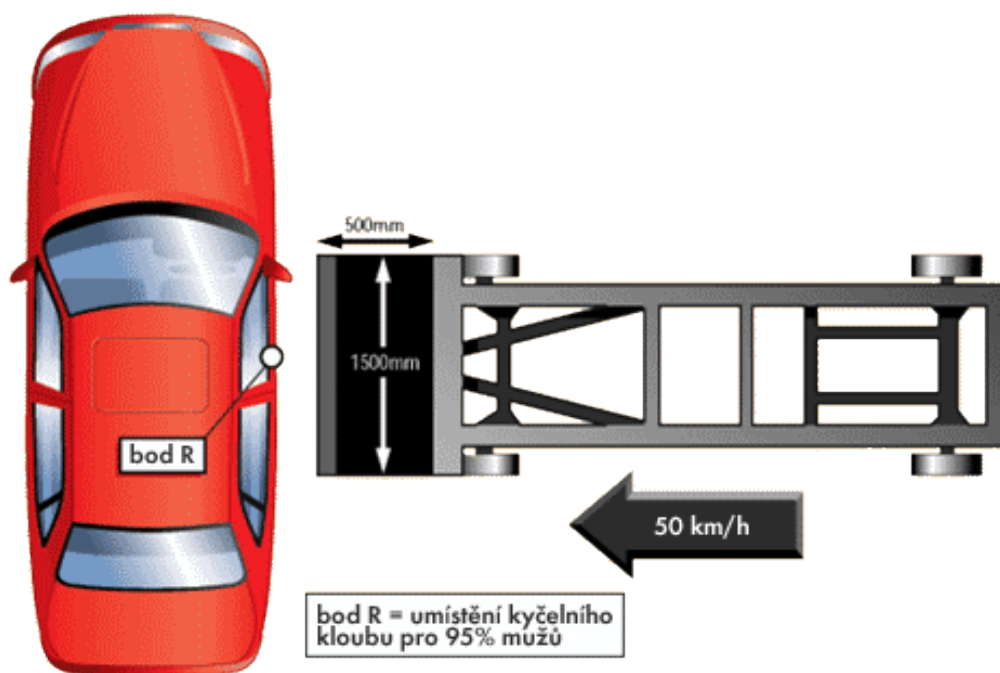
Automobil jedoucí rychlostí 64 km/h narazí do deformovatelné bariéry se 40% přesazením. Šířka bariéry je 1000 mm a deformace může dosahovat až 540 mm. Proti zákonným předpisům pro čelní náraz je rychlost automobilu o 8 km/h vyšší. [11]



Obr. 2.2.1: Čelní náraz automobilu do bariéry

Popis bočního nárazu prováděného společnostmi Euro NCAP:

Náraz je uskutečněn do boku stojícího vozidla beranidlem předepsaných rozměrů a hmotnosti, rychlost beranidla je 50 km/h. Touto zkouškou je testována pevnost dveří a odolnost vozidla, do kterého z boku narazí jiný automobil. Na obrázku je uveden test bočního nárazu pro automobil s řízením na pravé straně. [12]



Obr. 2.2.2: Boční náraz do automobilu

2.2.1.1 Crash Test – Škoda Octavia III

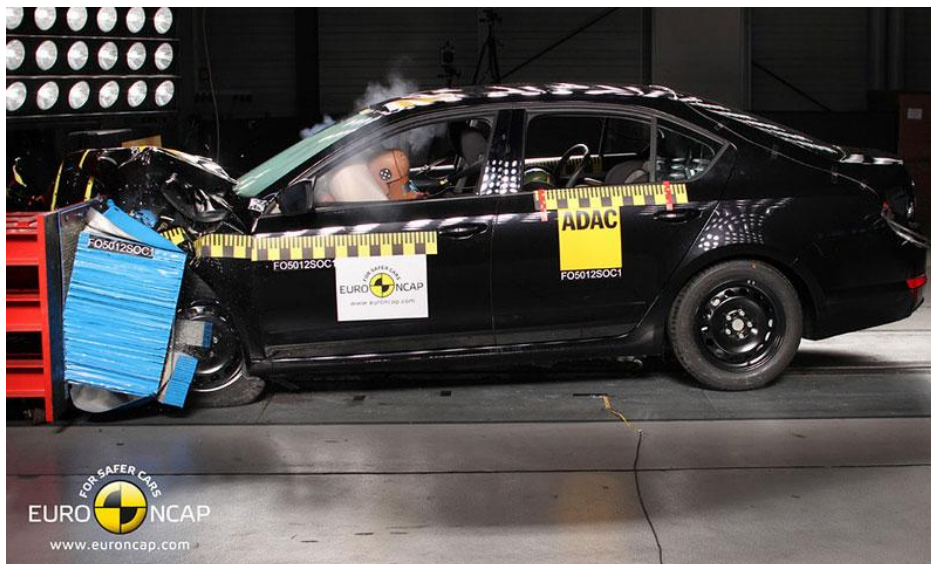
Škoda Octavia třetí generace (obr. 2.2.3) svými výsledky v testech Euro NCAP překonává předchozí dvě generace. Nová Škoda Octavia dosáhla vynikajících výsledků ve všech současných testech Euro NCAP, ale i u tohoto modelu je jistý prostor pro zlepšení ochrany cestujících i chodců [13]



Obr. 2.2.3: Škoda Octavia III

Test čelního nárazu automobilu:

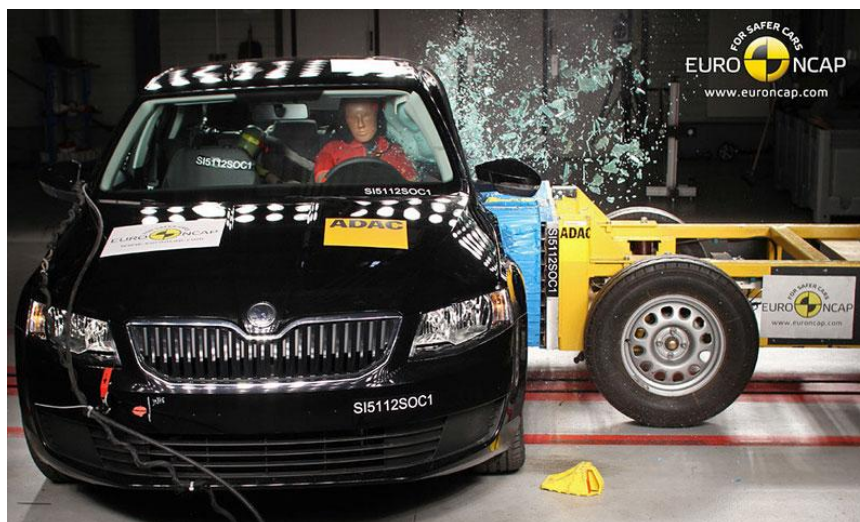
Během testu čelního nárazu zůstal prostor pro cestující stabilní. Zaznamenané údaje zkušebními figurínami indikovaly dobrou ochranu pro všechny části těla s výjimkou bérců řidiče, jejichž ochrana je dostatečná (obr. 2.2.6). Model Škoda Octavia III poskytuje stejnou ochranu pro cestující rozdílných výšek sedících v různých pozicích (obr. 2.2.4). [15]



Obr. 2.2.4: Čelní náraz automobilu Škoda Octavia III

Test bočního nárazu, nárazu zezadu a na sloup:

Při testu bočního nárazu byla ochrana všech částí těla dobrá a automobil v tomto směru získal maximální počet bodů. Sedadlo spolu s hlavovou opěrkou poskytuje taktéž dobrou ochranu krční páteře při nárazu ze zadu, tzv. whiplash. Při testu nárazu na sloup byla zaznamenána komprese žebér a ochrana byla vyhodnocena jako nízká (obr. 2.2.5, 2.2.6). [15]



Obr. 2.2.5: Boční náraz do automobilu Škoda Octavia III



Obr. 2.2.6: Zhodnocení Crash Testu automobilu Škoda Octavia III

2.3 Deformační chování materiálu

Podstatou tváření je měnit působením vnějších sil tvar těles tak, aby bylo dosaženo požadovaného tvaru. Klíčovým požadavkem je, aby tvar tělesa zůstal změněn trvale i po odstranění působení vnějších sil a aby v průběhu změny tvaru tělesa nevznikly v některých místech trhliny. K tomu je využíváno vlastností kovů za jistých podmínek trvale svůj tvar měnit (plasticky se deformovat). Každou trvalou deformaci (plastickou) vždy předchází deformace pružná (elastická).

Změnu tvaru, která je způsobena vnějšími nebo vnitřními silami, při níž zůstává zachována spojitost materiálu je nazývána deformací. Nastane-li v průběhu deformace porušení spojitosti materiálu vznikem trhlin nebo rozpadem tělesa, mluvíme o porušení. Každému porušení vždy předchází deformace. [16]

2.3.1 Elastická a plastická deformace

Tyto deformace se dělí na deformace vratné (deformace elastická) a deformace nevratné (deformace plastická). Po překročení meze elasticity dochází k plastické deformaci. [17]

2.3.1.1 Elastická deformace

Ideálně pružná deformace může být charakterizována těmito znaky:

- 1) Vratností. Po odlehčení působících sil nabývá těleso přesně původního tvaru.
- 2) Závislost mezi silami a deformacemi je navzájem jednoznačná. U kovů jde o tzv. potenciální pružnost, u níž práce se práce vnějších sil transformuje v energii potenciální, která je při odlehčování opět uvolňována.

Zatěžujeme-li těleso takovým způsobem, že po odlehčení nabývá stejný tvar a objem, mluvíme o elastické deformaci (pružné). Elastická deformace je způsobena relativně malým posunem atomů kolem rovnovážných poloh v krystalické mřížce. Znamená to tedy, že při pružné deformaci dochází k vychýlení atomů mřížky z jejich rovnovážné polohy. Po odstranění působení vnějších sil se atomy vrátí do původní polohy. V případě tahového napětí a poměrné deformace platí pro průběh elastické deformace Hookeův zákon. [16,17]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (13)$$

σ ... napětí [MPa]

E ... Youngův modul pružnosti v tahu [MPa]

ε ... poměrné prodloužení [-]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (14)$$

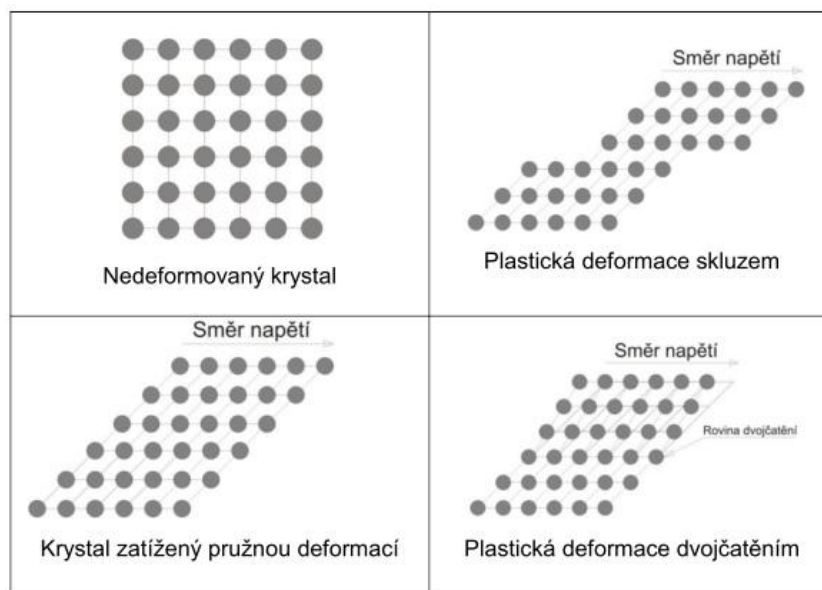
ΔL ... hodnota změny délky [mm]

L_0 ... původní délka [mm]

2.3.1.2 Plastická deformace

U všech pevných materiálů má velikost deformace jistou mez. Za touto mezí nastávají trvalé přeměny materiálu, trvalé deformace a ke vzniku trhlin. Tato mez je mezí elasticity.

Hlavním znakem plastické deformace je nevratnost. Rentgenovým rozbořem bylo zjištěno, že v průběhu plastické deformace krystalických materiálů zůstává krystalický charakter zachován. Mohou nastat deformace na hranicích zrn a deformace uvnitř zrn. Existují pouze dva mechanismy plastické deformace, při nichž zůstává krystalický charakter materiálu zachován. Těmi dvěma mechanismy jsou skluz a dvojčatění. Rozvíjen je vždy mechanismus, u kterého je při daných podmínkách potřeba menší energie. Skluz je realizován pohybem dislokací ve skluzových rovinách. Jedná se o nejčastější mechanismus plastické deformace. Dvojčatění je realizováno přesunem atomů v určité části krystalu, dochází ke vzniku souměrné oblasti mřížky podle roviny dvojčatění s neposunutou mřížkou (obr. 2.3.1). [16,17]



Obr. 2.3.1: Plastická deformace skluzem a dvojčatěním

2.4 Tváření vysokou rychlostí deformace

2.4.1 Princip

Rychlost deformace je základní procesní podmínkou tváření. Při tváření vysokou rychlostí deformace je tvářený dílec oproti konvenčním metodám zatěžován dynamicky. Obecně platí pravidlo, že s rostoucí rychlostí deformace dochází k poklesu tvárnosti, ale odpor proti deformaci roste.

Řídícím mechanismem plastické deformace je dvojčatění. Uvnitř materiálu se projevují setrvačné jevy a vzniká tlaková hydrostatická napjatost. Dochází k nárůstu deformačního odporu a od určité rychlosti deformace se objeví dynamická mez kluzu. Při procesu tváření vzrůstá teplota a vlivem toho dochází k odpevňování. Samotný proces tváření je považován za adiabatický.

Díky zvýšené plastičnosti materiálu lze vyrábět přesné dílce a provádět kalibraci tvaru s přebytkem energie. [18,19]

2.4.2 Oblast využití

Tváření vysokou rychlostí deformace poskytuje široké uplatnění. Tento způsob tváření je hojně využíván pro dílce z plechu se značnými rozměry, složitými tvary a u kterých jsou předepisovány velmi těsné tolerance rozměrů. Na takto vyrobených dílcích je možnost poté tvářet lemy, výstužná žebra, prolisy, vyboulení aj. S produkty vyrobenými touto metodou tváření se můžeme setkat v kosmickém, leteckém, armádním i chemickém průmyslu a v mnoha dalších odvětvích. [19]

2.4.3 Diagramy mezních přetvoření

Zkouška tahem je jednou ze základních zkoušek mechanických vlastností, nepostihuje tedy problematiku skutečného tváření. Z tohoto důvodu byla vždy snaha sestavit komplexně pojatý diagram lépe zohledňující faktory ovlivňující tváření. Pro tento účel byl Diagram mezních přetvoření (DMP) sestaven. Lze ho vnímat jako užitečné mapy plastičnosti daného plechu. Základní formou DMP je pásmo bodů představující hodnoty mezních přetvoření. Problematikou těchto diagramů se zabývalo několik autorů, z toho důvodu bylo vypracováno několik způsobů jejich určení. [20,21]

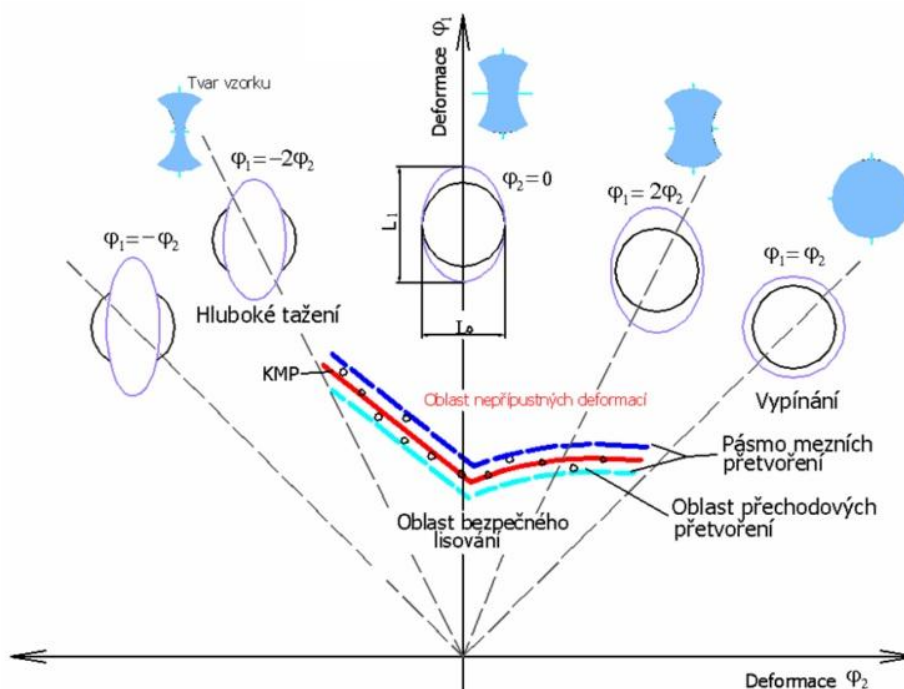
- 1) Tomlenův diagram - závislost ukazatele stavu napjatosti m_φ – intenzity přetvoření φ_1 .
- 2) Keller – Goodwinův diagram - závislost hlavního přetvoření φ_1 na přetvoření vedlejším φ_2 (obr. 2.4.1).

$$\text{Logaritmické přetvoření: } \varphi = \ln \frac{L}{L_0} [-] \quad (15)$$

L – konečná měřená délka [mm]

L_0 – počáteční měřená délka [mm]

$$\text{Ukazatel stavu přetvoření: } m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (16)$$



Obr. 2.4.1: Keller – Goodwinův diagram mezních přetvoření

Ukazatel stavu přetvoření tvoří v diagramu tzv. lineární deformační stopy. Jedná se o přímky vycházející z počátku souřadného systému a ukazatel stavu přetvoření je na nich roven konstantě. Keller – Goodwinův diagram je názornějším a výstižnějším, je tedy používán častěji (obr. 2.4.1). [20,21]

2.4.4 Vliv rychlosti deformace na Diagram mezních přetvoření

Diagram mezních přetvoření je komplexním diagramem a tím pádem se vyskytuje množství činitelů, které jej ovlivňují. Mezi těmito vlivy lze najít samotnou hutní výrobu materiálu, vliv různých materiálů, tloušťku plechu, rychlost přetvoření, technologické podmínky i historii přetvoření. [20,21,22]

2.4.4.1 Definice rychlosti deformace

Definice rychlosti deformace je uvedena jako poměr derivace přetvoření podle času, rovnice (17).

$$c = \frac{d\varphi}{dt} [\text{s}^{-1}] \quad (17)$$

Volbou několika tvářecích strojů s různou rychlostí beranu lisu či regulací rychlosti posuvu beranu lisu při dodržení ostatních podmínek tváření lze měnit rychlost deformace. Pokud se nejedná o technologické zkoušky, kdy je snaha přiblížit rychlost deformace, co nejbližší reálným podmínkám tváření, je rychlost deformace pro normalizované zkoušky předem stanovena. [20,21,22]

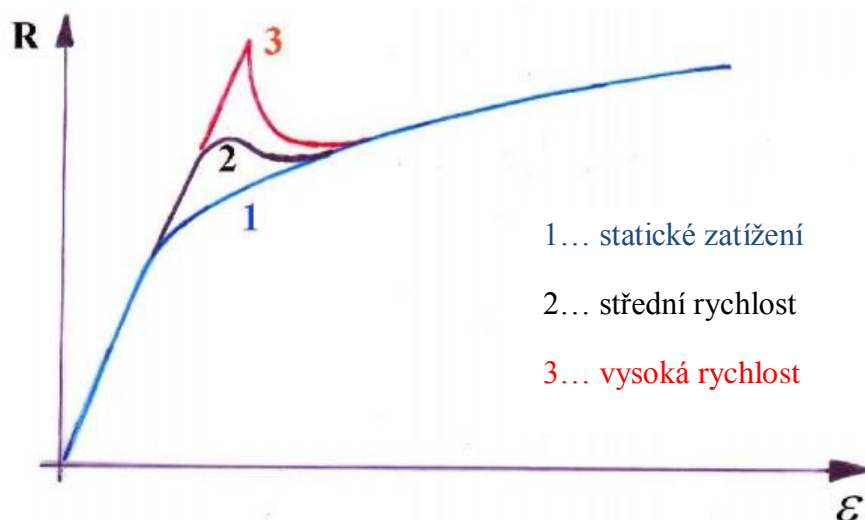
2.4.4.2 Vliv rychlosti deformace na vlastnosti materiálu

U křehkých kovů praskajících křehkým lomem bez místní kontrakce, dochází působením větší rychlosti deformace k poklesu pevnosti. S rostoucí rychlostí zatěžování se labilní stav udrží déle a horní mez kluzu je vyšší. Vliv rychlosti zatěžování je nejpatrnější u tváření měkkých ocelí ve vyžíhaném stavu, kdy je převýšení horní meze největší.

S rostoucím obsahem uhlíku klesá citlivost na rychlost zatěžování. Při poklesu rychlosti napínání dochází k výraznému snížení meze kluzu a tažnosti, ale pouze k nepatrnému snížení pevnosti. Nárůst rychlosti zatěžování způsobí nepatrné zvýšení pevnosti a tažnosti, ale rychlý nárůst meze kluzu.

Při tváření nerezavějících feritických ocelí je pevnost i tažnost na rychlosti zatěžování téměř nezávislá, pouze mez kluzu je ovlivněna podmínkami zkoušky. Nerezavějící austenitické oceli jsou oproti feritickým ocelím velmi citlivé na rychlost zatěžování. Při nízké rychlosti zatěžování mají tyto oceli větší pevnost i tažnost než při vysokých rychlostech, ale mez kluzu tím není prakticky ovlivněna. Při pomalé rychlosti zatěžování se u většiny kovů mění tažnost a kontrakce minimálně. Naopak hodnota meze kluzu oceli

stoupá velmi výrazně, tím pádem někdy leží nad mezí pevnosti (obr. 2.4.2). [20,21,22]



Obr. 2.4.2: Změna meze kluzu při různých rychlostech zatížení

Čím má kov vyšší teplotu tání, tím je vliv rychlosti zatěžování menší. U feritických ocelí vlivem nízkých teplot při rychlém trhání klesá houževnatost materiálu a dochází k jeho přetržení již bez deformace křehkým lomem. Výjimku tvoří například TWIP oceli.

S rostoucí rychlostí deformace a zvyšující se teplotou se zvyšuje tvářitelnost materiálu. Rostoucí rychlost deformace má vliv na posun hranice pro uplatnění křehkého lomu směrem k nižším teplotám, což je nepříznivé. [20,21,22]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Cíle bakalářské práce

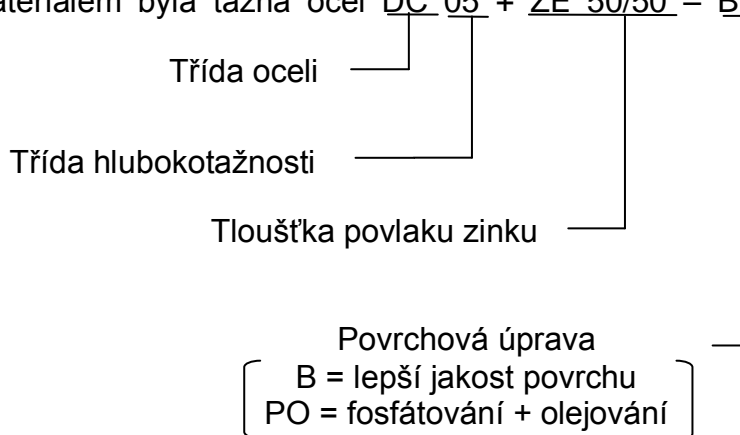
Hlavním cílem této práce bylo odzkoušet nové zkušební zařízení CEAST 9350 od firmy INSTRON při hodnocení vlivu rychlosti zatížení (deformace) materiálu na jeho mechanické vlastnosti, tedy zda dochází k nárůstu či poklesu mechanických vlastností s rostoucí rychlostí deformace. Základní mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu byly odečteny z jeho materiálového listu (tab. 1, tab. 2).

Odečtené vlastnosti materiálu byly následně ověřeny statickou zkouškou tahem při pokojové teplotě dle normy EN ISO 6892 – 1 pomocí statického trhacího zařízení TIRAtest 2300 s použitím tenzometrické snímací hlavy s rozsahem 10 kN.

Pro zjištění vlivu rychlosti zatížení (deformace) na mechanické vlastnosti byly vzorky podrobeny zkoušce vypínání vysokou rychlostí použitím nového zkušebního zařízení CEAST 9350 od firmy INSTRON s použitím snímací hlavy s rozsahem 90 kN. Bližší informace o tomto zařízení jsou popsány níže (obr. 3.3.1).

3.1.1 Testovaný materiál

Zkoušeným materiálem byla tažná ocel DC 05 + ZE 50/50 – BPO (EN 10152).



Tab. 1: Chemické složení zkoušeného materiálu

Chemické složení [hm. %]:			
C	Mn	P	S
max. 0,06	max. 0,35	max. 0,025	max. 0,025

Tab. 2: Vlastnosti materiálu dle jeho materiálového listu

Mechanické vlastnosti	
Stav	převálcovaný za studena
Mez kluzu R_e nebo $R_p 0,2$ [MPa]	180
Mez pevnosti R_m [MPa]	270 - 330
Tažnost A_{80} [%]	40
Kontrakce Z [%]	-
Nárazová práce [J]	-
Tvrдость HB	-
Součinitel normálové anizotropie r_{90}	1,9
Exponent deformačního zpevnění	0,2
Fyzikální vlastnosti	
Hustota ρ [kg . m ⁻³]	7 850

Tento materiál je vyráběn válcováním za studena při teplotě okolního prostředí a následně je na něj v lázni nanášena vrstva zinku. Je dodáván v tloušťkách 0,6 – 3,0 mm, v našem případě se jednalo o tloušťku plechu 0,8 mm. Ocelové pásy jsou dodávány dle normy EN 10152 a rozměrové tolerance dle normy EN 10131.

Jedná se o mnohostranný materiál, jenž je využíván pro svoji vynikající korozní odolnost na výrobu průmyslových zařízení, karosérií, krytin střech atd. Je snadno tvarovatelný a přitom pevný. Vzhledem k tenké povrchové vrstvě zinku se povrch tohoto materiálu dále upravuje lakováním. [23]

3.2 Ověření mechanických vlastností zkoušeného materiálu

3.2.1 Příprava vzorků

Ze zkoušeného materiálu DC05 + ZE 50/50 – BPO byl střížným nástrojem odebrán zkušební vzorek ve směru válcování materiálu 0°. Následně byl upraven frézováním a broušením na požadovaný tvar a rozměry příslušnou normou EN ISO 6892 – 1 (obr. 3.2.1). Počáteční měřená délka zkušební vzorku byla $L_0 = 80$ mm. Rozměry vzorku byly (0,8 x 20,15) mm, počáteční průřez zkušební vzorku byl tedy $S_0 = 16,12$ mm².

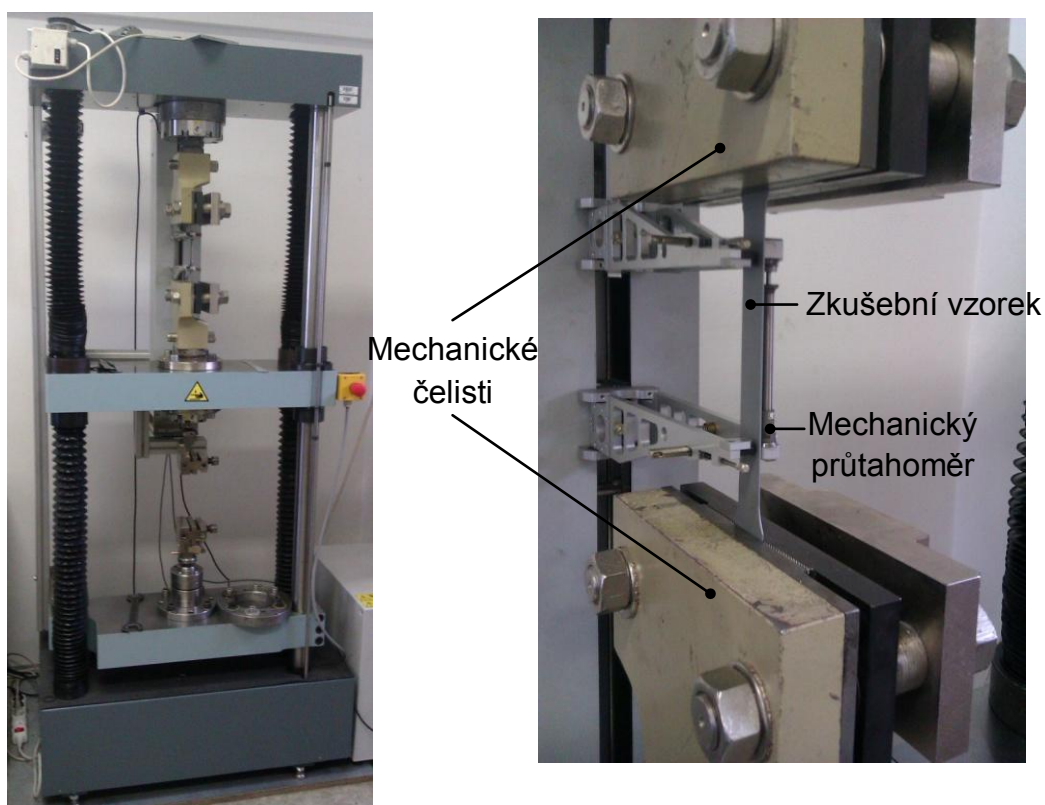


Obr. 3.2.1: Zkušební vzorek

3.2.2 Průběh zkoušky

Statická zkouška tahem proběhla dle normy EN ISO 6892 – 1 na statickém trhacím zařízení TIRAtest 2300. Pro zkoušku byla použita tenzometrická snímací hlava s rozsahem 10 kN.

Zkušební vzorek byl upnut do mechanických čelistí a po přiložení mechanického průtahoměru (obr. 3.2.2) byla zahájena statická zkouška tahem. Rychlost zatěžování vzorku byla 10 mm/min, ostatní vstupní hodnoty statické zkoušky tahem jsou uvedeny v tab. 3. Zkoušený materiál byl podroben pěti jednotlivým měřením, následně byly stanoveny průměrné hodnoty mechanických vlastností (tab. 4) a sestaven graf závislosti $R - \varepsilon$ (obr. 3.2.3).



Obr. 3.2.2: Trhací zařízení TIRAtest 2300

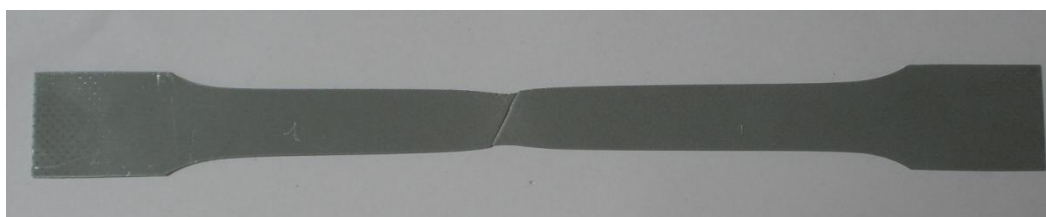
Tab. 3: Přehled vstupních hodnot zkoušky tahem

Vstupní hodnoty statické zkoušky tahem	
Testovaný materiál	DC 05 ZE 50/50 - BPO
Norma	EN 10152
Rychlost zatěžování	10 mm/min
Rozměr vzorku	0,8 x 20,15 mm
Směr odebrání vzorku	0°

3.2.3 Vyhodnocení zkoušky

Hodnota deformace zkušební vzorku byla měřena pomocí externího mechanického průtahoměru, který je příslušenstvím trhačního zařízení TIRAtest 2300. Výsledky měření byly vyhodnoceny použitím softwaru Labtest v 3.1. Z naměřených hodnot byl sestaven graf průběhu zkoušky (obr. 3.2.4) Byly vytvořeny přehledové tabulky naměřených hodnot (tab. 4, tab. 6, přiložený protokol).

Výsledné hodnoty statické zkoušky tahem dle normy EN ISO 6892 – 1 odpovídaly stanoveným hodnotám materiálu DC 05 + ZE 50/50 – BPO v jeho materiálovém listu (tab. 4, tab. 5, viz. příloha).



Obr. 3.2.3: Zkušební vzorek po přetržení

Tab. 4: Hodnoty mechanických vlastností materiálu DC05 + ZE 50/50 – BPO

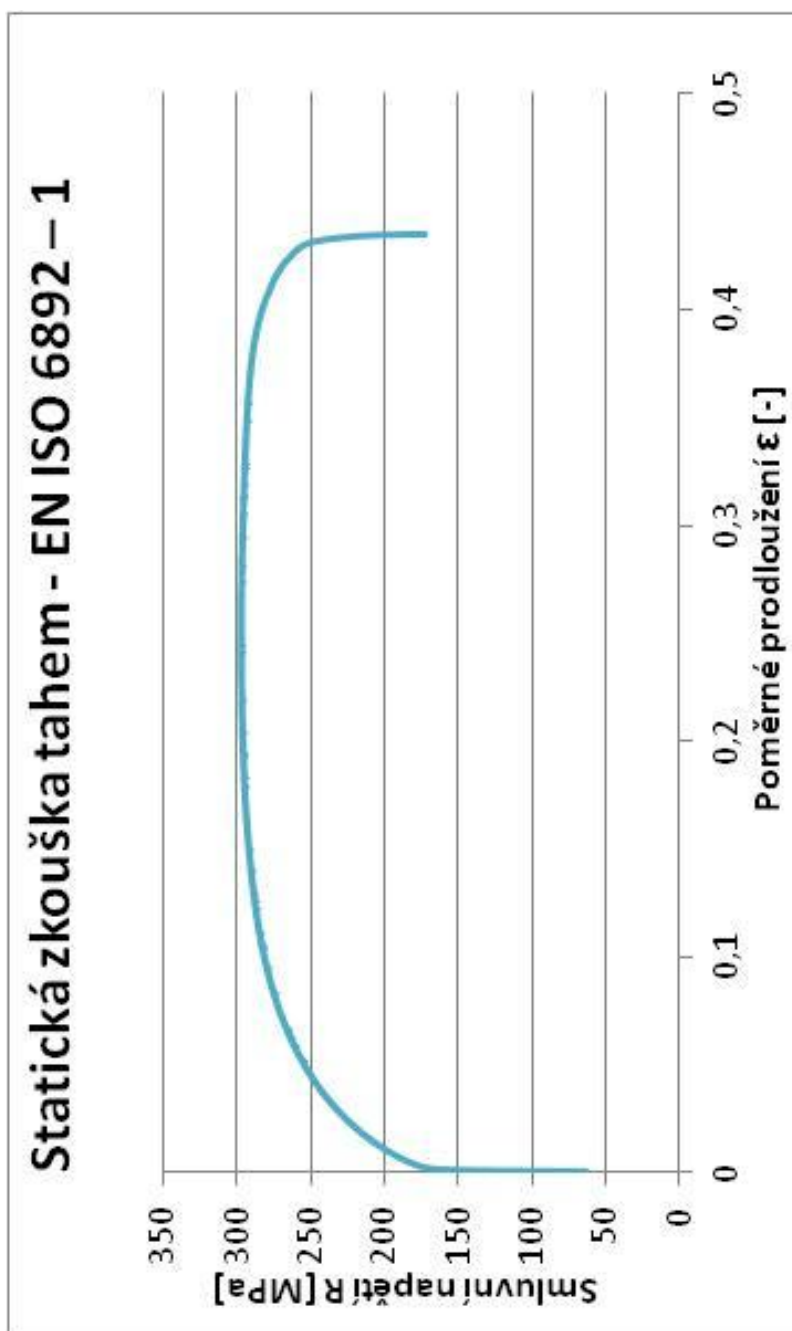
Číslo zkoušky	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [%]
1	179,9	297,9	42,9
2	175,2	290,6	43,9
3	179,3	297,9	44,5
4	175,2	290,6	43,9
5	177,5	294,2	43,4

Tab. 5: Hodnoty mechanických vlastností materiálu dle materiálového listu

$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [%]
180	270 - 330	40

Tab. 6: Statistické hodnoty statické zkoušky tahem

Statistická hodnota	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [%]
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	177,4	294,3	43,7
Směrodatná odchylka	2,2	3,6	0,6
Minimální hodnota	175,2	290,6	42,9
Maximální hodnota	179,9	297,9	44,5



Obr. 3.2.4: Diagram statické zkoušky tahem materiálu DC05 + ZE 50/50 – BPO

3.3 Vypínání vzorků vysokou rychlostí

3.3.1 INSTRON – CEAST 9350

Jedná se o vysokorychlostní trhací zařízení firmy INSTRON pro více druhů rázových zkoušek včetně rázové zkoušky tahem, vypínání, metody Izod a Charpy (obr. 3.3.1). Zařízení CEAST 9350 spolupracuje se softwarem CeastVIEW dodávaným také firmou INSTRON (popsaný níže). Zařízení dokáže vyvinout dopadovou energii v rozmezí 0,59 -1800 J a dopadovou rychlost od 0,77 – 24,0 m/s (2,77 – 86,4 km/h). Součástí zařízení je snímací hlava s rozsahem 90 kN, dále kompresor a systém pro získávání dat měření (obr. 3.3.2). [24]



Obr. 3.3.1: INSTRON – CEAST 9350 Optional Features



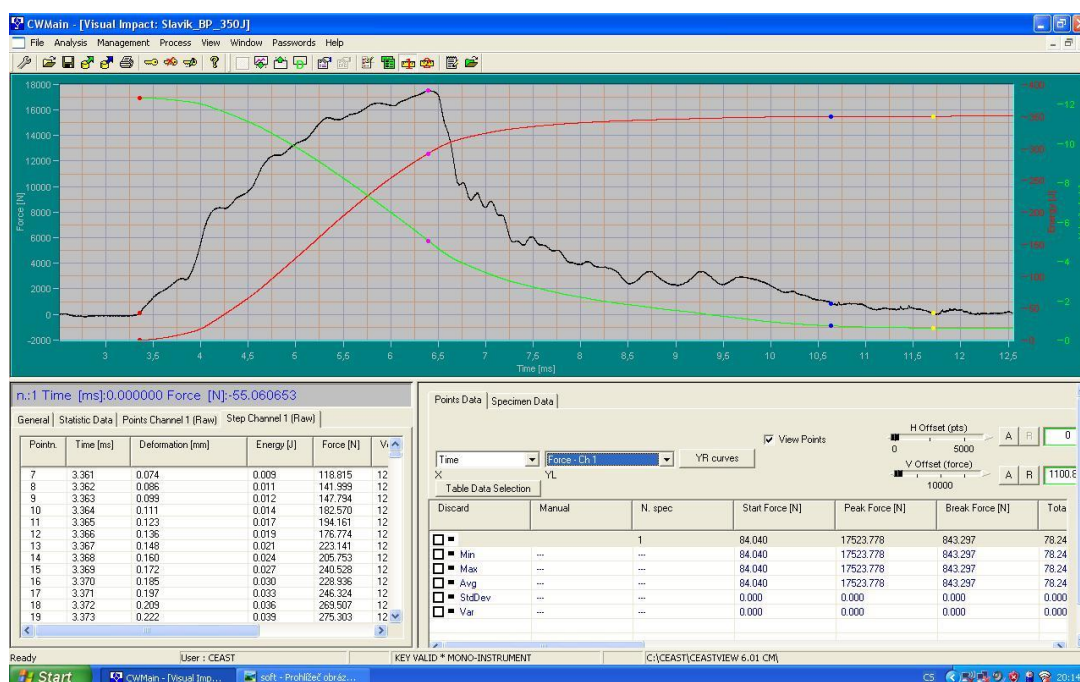
Obr. 3.3.2: Systém pro získávání dat z průběhu zkoušky

3.3.1.1 Software CeastVIEW 6.01

Tento software pro vyhodnocování zkoušky je dodáván firmou INSTRON jako součást trhačního zařízení. Prostředí softwaru je zobrazeno na obr. 3.3.3.

Dokáže vyhodnotit průběh síly, energie, rychlosti, deformace a času. Frekvence snímkování a vyhodnocování průběhu zkoušky lze nastavit v rozmezí 50 – 2000 kHz (námi použitá frekvence byla 1000 kHz). Software dokáže vygenerovat přes 65 000 bodů, kdy doba trvání zkoušky je 65,5 ms a čas vzorkování 0,001 ms. Měřený pracovní rozsah lze nastavit pro 10, 20, 50 a 100% (námi použitý rozsah byl 50%).

Data zkoušky lze exportovat v různé podobě do programu Microsoft Office Excel i jako běžný textový dokument v různých podobách. Před exportem (tiskem) dat je důležité nastavit parametry exportovaných (tisknutých) dat, jinak nelze export provést. Lze nastavit zobrazení minimálních, maximálních i průměrných hodnot. Je možné také vytvořit a vytisknout report dané zkoušky (obr. 3.3.15, seznam příloh).



Obr. 3.3.3: Prostředí softwaru CeastVIEW 6.01

3.3.2 Příprava vzorků

Ze zkoušeného materiálu DC 05 + ZE 50/50 – BPO tloušťky 0,8 mm bylo nastříháno pět zkušebních vzorků o rozměrech (215 x 215) mm, následně bylo do každého vzorku vyvrtáno šest otvorů o průměru \varnothing 15 mm.

3.3.3 Průběh zkoušky

Zkouška proběhla na vysokorychlostním zkušebním zařízení od firmy INSTRON – CEAST 9350 popsané výše (obr. 3.3.1). Pro zkoušku byla použita snímací hlava s rozsahem 90 kN, jenž je součástí zkušebního zařízení.

Materiál byl upnut mezi přidržovač a upínací desku pomocí šesti šroubů (obr. 3.3.4). Po nastavení vstupních parametrů, respektive dopadové energie a dopadové rychlosti nástroje (tab. 7), byla zahájena zkouška vypínáním vysokou rychlostí. Materiál byl vždy podroben třem měřením pro každou hodnotu dopadové energie, následně byly stanoveny průměrné hodnoty jednotlivých měření. Měření probíhalo při pokojové teplotě 23°C a bylo zahájeno při hodnotě dopadové energie 50 J, které odpovídala dopadová rychlost 4,66 m/s. Na zkušební vzorek byla vždy v místě dopadu nástroje přiložena PE (polyethylenová) distanční vložka a použito mazivo Mogul A00 pro nástroj. Jestliže nebylo mazivo použito, docházelo ke vzniku nežádoucích trhlin. Hodnota dopadové energie nástroje byla postupně zvyšována až do porušení zkoušeného materiálu. Pro zajímavost si lze všimnout, že hodnoty dopadové rychlosti se blíží hodnotám rychlosti, při kterých probíhá Crash Test automobilu prováděn společností Euro NCAP (tab. 7, tab.8).

Tab. 7: Přehled dopadové energie a rychlosti

Dopadová energie [J]	50	100	200	300	350
Dopadová rychlost [m/s]	4,66	6,59	9,31	11,42	12,33
Dopadová rychlost [km/h]	16,78	23,72	33,52	41,11	44,39

Tab. 8: Crash Testy prováděné společností Euro NCAP

Testy prováděné společností Euro NCAP	
Čelní nárazová zkouška	64 km/h
Boční nárazová zkouška	50 km/h
Boční nárazová zkouška do stromu	29 km/h
Náraz do chodce	40 km/h



Obr. 3.3.4: Upnutí vzorku – přidržovač

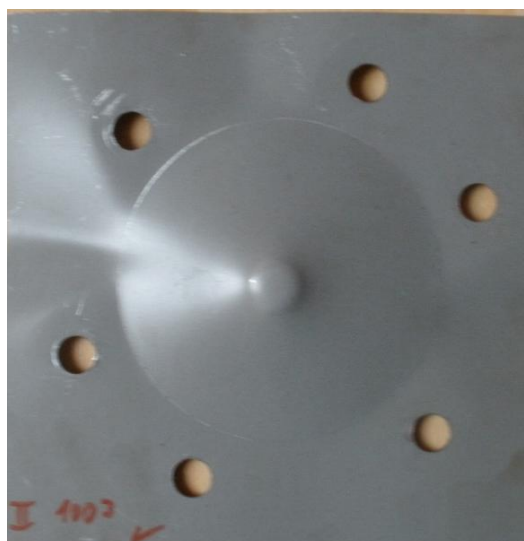
3.3.4 Vyhodnocení zkoušky

Data průběhu deformace zkušebního vzorku byla měřena optickým čidlem, jenž je součástí zkušebního zařízení CEAST 9350.

Při zvyšující se dopadové energii se logicky navyšovala dopadová rychlost nástroje a vzrůstala maximální působící síla na zkušební vzorek. V průběhu zkoušky došlo ke zvlnění okrajů zkušebních vzorků (obr. 3.3.5, 3.3.6.), ale výsledky zkoušky tím nebyly nijak zásadně ovlivněny.



Obr. 3.3.5: Vzorek – 50 J



Obr. 3.3.6: Vzorek – 100 J

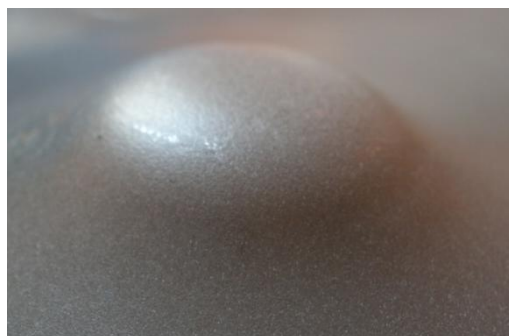
Při hodnotě dopadové energie 50 J byl vzorek deformován pouze nepatrně (obr. 3.3.7). Při následujících hodnotách se deformace zkušební vzorku zvyšovala, jak lze pozorovat na následujících obrázcích. K porušení vzorku došlo při hodnotě dopadové energie 350 J (12,33 m/s), které odpovídala maximální působící síla 17 868 N a rychlost nástroje v momentě porušení materiálu byla 5,05 m/s (obr. 3.3.11).



Obr. 3.3.7: Vzorek – 50 J



Obr. 3.3.8: Vzorek – 100 J



Obr. 3.3.9: Vzorek – 200 J



Obr. 3.3.10: Vzorek – 300 J



Obr. 3.3.11: Vzorek – 350 J

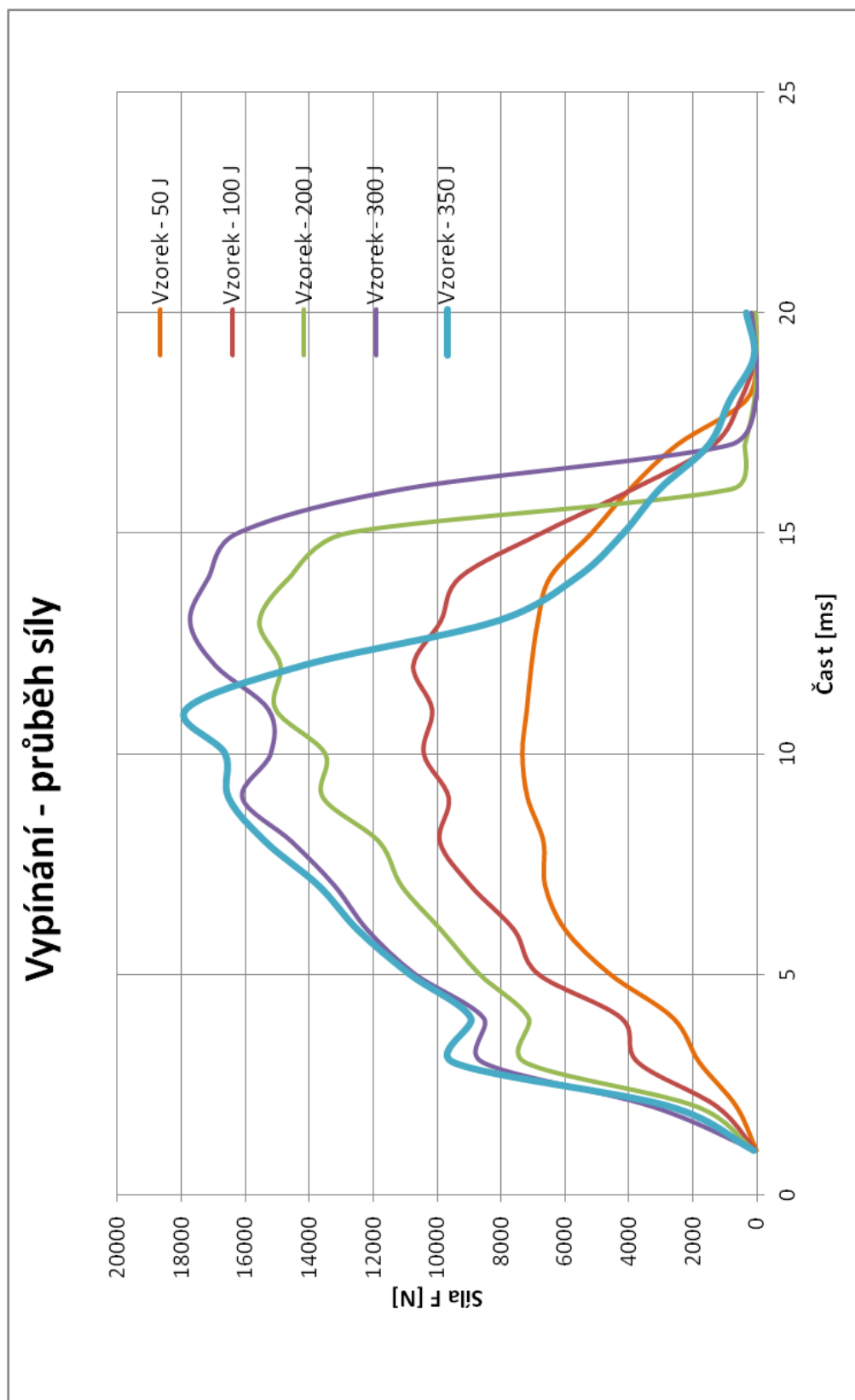
K vyhodnocení průběhu zkoušky byl použit software CeastVIEW 6.01, který je popsán výše. Tímto softwarem byly vygenerovány data průběhu zkoušky pro jednotlivé vzorky a exportovány do softwaru Microsoft Office Excel. Následně byly vytvořeny grafy a tabulky průběhu zkoušky.

Na obr. 3.3.13 je znázorněno, jak se vzrůstající hodnotou dopadové energie (dopadové rychlosti) vzrůstala hodnota působící síly na zkušební vzorek a při porušení zkušebního vzorku (Vzorek – 350 J, viz. obr. 3.3.12) došlo k prudkému poklesu síly.

Nadruhou stranu je s podivem, že nedochází při začátku deformace vzorků ke vzniku tzv. peaku (viz. obr. 3.3.13) Toto zvýšení síly při dynamickém zatěžování materiálu je charakteristické pro téměř všechny způsoby zatěžování a je tím výraznější, čím je vyšší dopadová rychlost působícího nástroje. V našem případě ke vzniku zvýšení nedošlo a to pro všechny použité zatěžovací rychlosti. Potlačení tohoto efektu bylo pravděpodobně způsobeno upínacím přípravkem tvářených vzorků a jeho umístěním ve stroji. Přípravek jako takový nebyl pevně fixován a upnut k rámu stroje a tím dochází k výraznému tlumení počátečního nárustu síly vlivem vůlí než je přípravek zatížen.

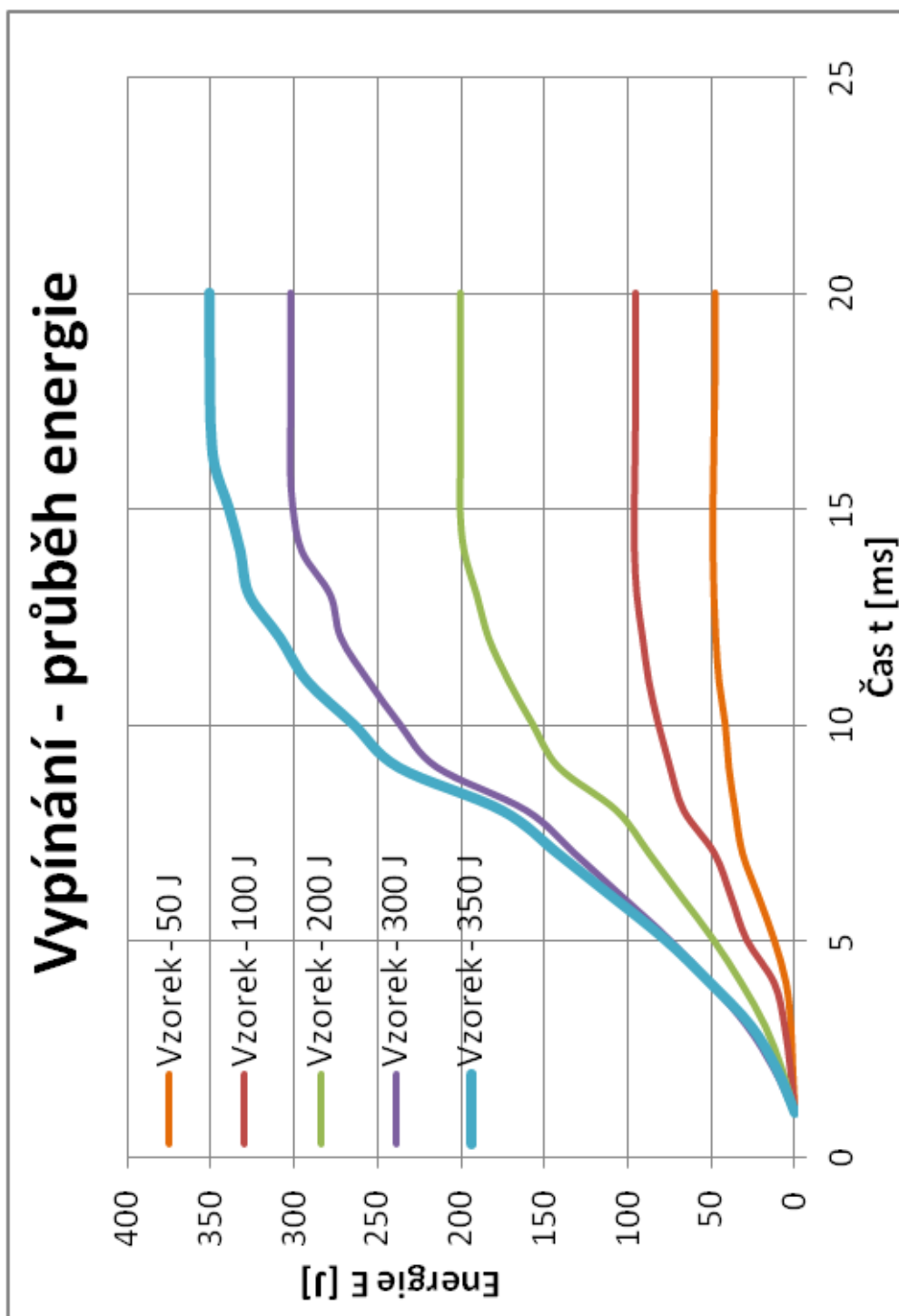


Obr. 3.3.12: Vzorek 350 J



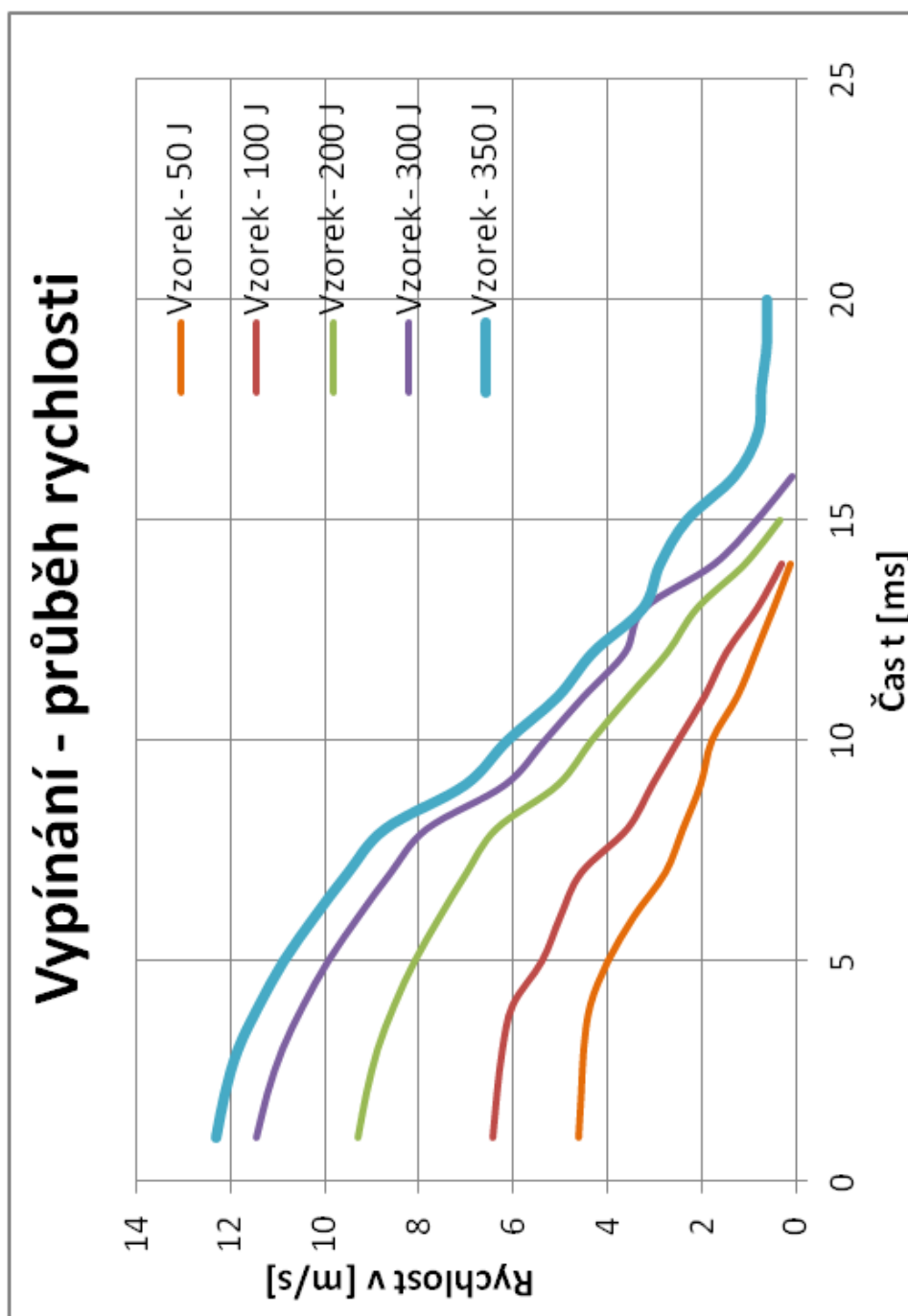
Obr. 3.3.13: Vypínání - průběh síly v závislosti na čase

Se zvyšováním hodnoty dopadové energie (dopadové rychlosti) byl nárůst energie logicky prudší. Při hodnotě dopadové energie 350 J byl tedy nárůst energie nejprudší (obr. 3.3.14)



Obr. 3.3.14: Vypínání - průběh energie v závislosti na čase

Na obr. 3.3.15 je uveden průběh poklesu rychlosti nástroje. Při porušení vzorku (Vzorek – 350 J) si lze všimnout, že rychlost nedosáhla nulové hodnoty jako u ostatních vzorků. Logicky to bylo způsobeno tím, že při protržení zkušebního vzorku nástroj pokračoval ve své dráze dále. U ostatních hodnot dopadové energie, kdy nedošlo k protržení zkušebního vzorku, dosáhl nástroj nulové rychlosti a poté se vrátil do své základní polohy.

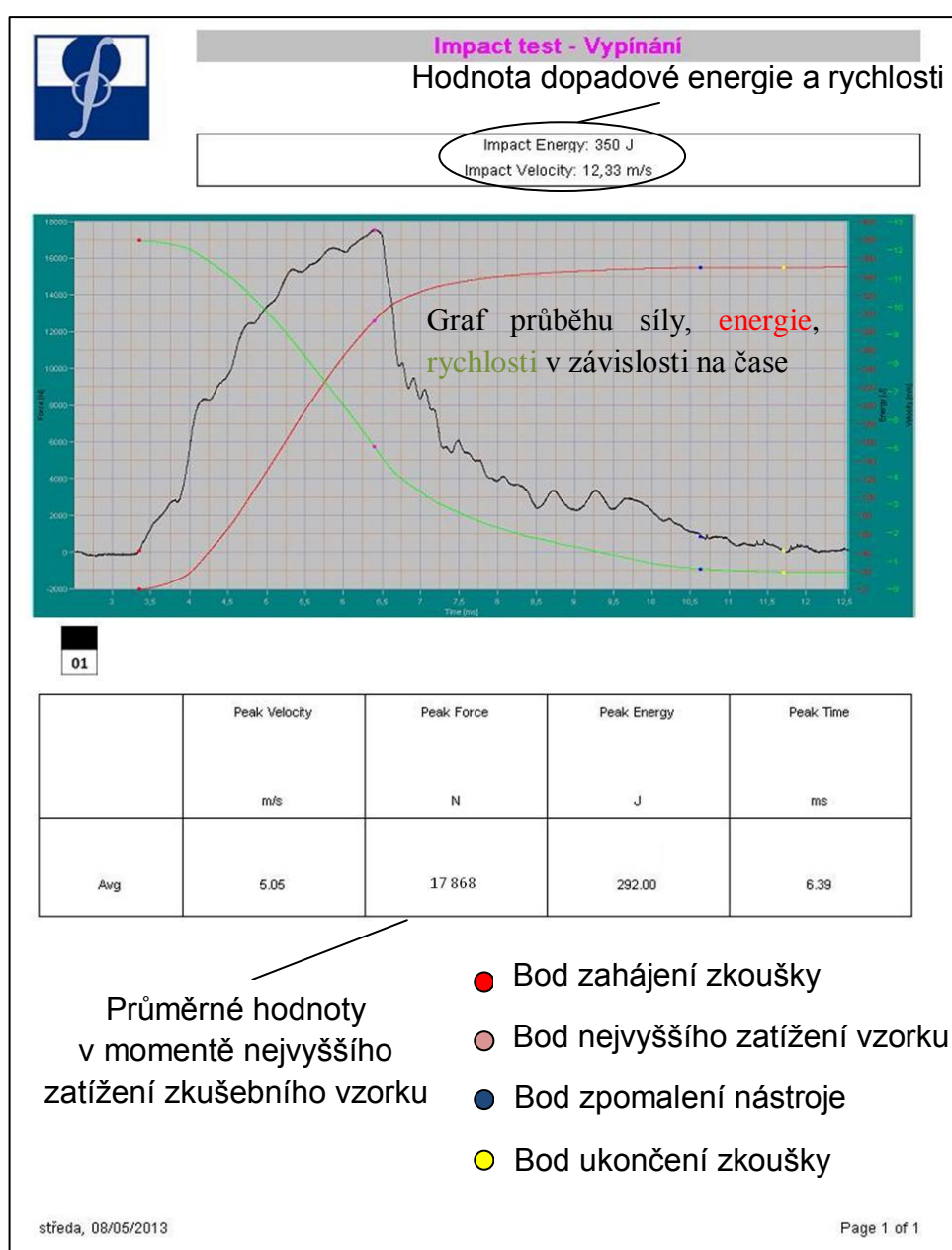


Obr. 3.3.15: Vypínání - průběh rychlosti v závislosti na čase

Tab. 9: Přehled hodnot v momentě působení maximálního zatížení

Dopadová energie [J]	50	100	200	300	350
Dopadová rychlost [m/s]	4,66	6,59	9,31	11,42	12,33
Max. síla [N]	7 354	10 743	15 575	17 751	17 868
Energie [J]	42	91	190	279	292
Rychlost [m/s]	1,79	1,47	2,12	3,23	5,05

K této bakalářské práci je přiloženo pět protokolů s uvedením průměrných hodnot jednotlivých měření pro každou dopadovou energii zvlášť. Protokol je popsán na obr. 3.3.16.



Obr. 3.3.16: Vypínání – popis protokolu



4. HODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

Hodnoty základních mechanických vlastností byly odečteny z materiálového listu zkoušeného materiálu a následně ověřeny statickou zkouškou tahem dle normy EN ISO 6892 – 1 na trhacím zařízení TIRAtest 2300. Naměřené hodnoty statickou zkouškou tahem odpovídaly odečteným hodnotám z materiálového listu.

Pro zjištění vlivu rychlosti deformace byly vzorky podrobeny zkoušce vypínáním vysokou rychlostí na novém zkušebním zařízení CEAST 9350 firmy INSTRON. Zařízení je i přes své malé rozměry a hmotnost velmi universálním. Toto zařízení umožňuje měnit libovolně dopadovou rychlost (rozsah: 0,77 – 24,0 m/s) a energii tažníku (rozsah: 0,59 -1800 J).

Ze získaných výsledků zkouškou vypínání jednoznačně vyplývá, že se zvyšující se rychlostí tažníku (rychlostí deformace) dochází k nárůstu hodnot mechanických vlastností materiálu. Dílčí zhodnocení jednotlivých parametrů bylo provedeno v kapitole 3.3.4.

5. ZÁVĚR

Tato práce vznikla především z důvodu prověřit možnosti nového zkušebního zařízení CEAST 9350 od firmy INSTRON. Dílčím cílem bylo zjištění vlivu rychlosti deformace na mechanické vlastnosti materiálu.

Zkoušení vlivu rychlosti byl podroben materiál DC 05 + ZE 50/50 – BPO. Tento materiál patří do skupiny hlubokotažných ocelí, z které se běžně vyrábějí karoserie automobilů.

Základní mechanické vlastnosti byly odečteny z materiálového listu zkoušeného materiálu a následně ověřeny statickou zkouškou tahem dle normy EN ISO 6892 - 1. Deformace zkušebního vzorku byla měřena mechanickým průtahoměrem.

Chování materiálu při vysoké rychlosti zatížení bylo ověřeno metodou vypínání při vysoké rychlosti na vysokorychlostní trhačce CEAST 9350 firmy INSTRON. Toto zařízení umožňuje libovolně měnit hodnotu dopadové energie a tím pádem i dopadové rychlosti tažníku. Lze dosáhnout dopadové energie 1800 J a dopadové rychlosti až 24 m/s. Postupně se navyšovala hodnota dopadové energie tažníku (dopadové rychlosti) až do porušení zkušebního vzorku. Zkoušený materiál byl porušen při hodnotě dopadové energie 350 J, tomu odpovídala dopadová rychlost 12,33 m/s, což je 44,39 km/h. Jen pro srovnání, rychlost automobilu při průběhu Crash testu simulujícího srážku s chodcem je 40 km/h.

Tato práce se nezabývala konkrétním vlivem deformační rychlosti materiálu, ale pouze obecně stanovila chování a změnu mechanických vlastností materiálu při vysoké rychlosti deformace. Pevně věřím, že nabyté zkušenosti s novým zkušebním zařízením usnadní práci dalším studentům při jeho případném použití. A i přesto, že hlavním cílem bylo vyzkoušet nové zkušební zařízení CEAST 9350, jsou výsledky této bakalářské práce příspěvkem pro řešení široké problematiky, která se týká tvářitelnosti materiálů.



6. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] LEBEDA F., Analýza deformačního chování vysokopevnostní oceli DOCOL 1200 využívající BH efektu, (Diplomová práce), Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha 2010, dostupné na: <http://vskp.czu.cz/>, on-line, citace [2.5.2013]
- [2] PRUCEK R., Stránky věnované zákonu o chemických látkách a chemických směsích a o změně některých zákonů č. 350/2011 (Chemický zákon), dostupné na: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf on-line, citace [2.5.2013]
- [3] Speciální technologie, TU v Liberci, dostupné na: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/spt.htm>, on-line, citace [2.5.2013]
- [4] POČTA B., Základy teorie tváření kovů. SNTL Praha 1966
- [5] ŠEBESTA M., Destruktivní zkoušky materiálu, (Bakalářská práce), Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha 2012, dostupné na: <http://vskp.czu.cz/>
- [6] Výrobce ovládacích zařízení, dostupné na: <http://www.apemswitches.be/>, on-line, citace [2.5.2013]
- [7] TOMČÍK P., TROJAN R., Laboratorní cvičení pro předmět Teorie tváření, Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2007, dostupné na: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/Skripta-Teorie%20Tv%C3%A1%C5%99en%C3%AD.pdf>, on-line, citace [2.5.2013]
- [8] Informační portál Hliník.info, dostupné na: <http://www.hlinik.info/zajimavost/tvareni-plechu>, on-line, citace [2.5.2013]
- [9] HUŠEK M., Tvářitelnost tenkých ocelových plechů s povrchovou úpravou eloxovaného hliníku, (Dizertační práce), Vysoké učení technické v Brně, Brno 2011, dostupné na: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/8887/DDP%20-%20Hu%C5%A1ek.pdf?sequence=1>, on-line, citace [2.5.2013]
- [10] Metody tváření kovů a plastů, TU v Liberci, dostupné na: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/mtk/MTK3.pdf, on-line, citace [2.5.2013]
- [11] VOGEL M., Crash Test, (Semestrální práce), České vysoké učení technické v Praze, dostupné na: digiworld.wz.cz/bc/sp.doc, on-line, citace [2.5.2013]



- [12] DOUBEK P., Hodnocení tvařitelnosti tenkých plechů při vysokých rychlostech deformace, (Disertační práce), TU v Liberci, Liberec 2009
- [13] Crash Testy Euro NCAP,
<http://auta5p.eu/informace/bezpecnost/ncap.php>, on-line, citace [2.5.2013]
- [14] Novinky ze světa automobilů, dostupné na: <http://www.autonovinky.8u.cz/?p=1663>, on-line, citace [2.5.2013]
- [15] Svět automobilů, dostupné na: <http://auto.cz/euro-ncap-2013-skoda-octavia-pet-hvezd-treti-generaci-73231>, on-line, citace [2.5.2013]
- [16] Farlík A., Ondráček E., Teorie dynamického tváření. SNTL Praha 1968
- [17] NĚNIČKA F., Tažení plechu a jeho verifikace počítačovou simulací, (Diplomová práce), Vysoké učení technické v Brně, Brno 2012, dostupné na: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/13278/DP_Filip_Nenicka.pdf?sequence=1, on-line, citace [2.5.2013]
- [18] PAVÉZKA V., Progresivní technologie ve výrobě tvářených součástí, (Bakalářská práce), Vysoké učení technické v Brně, Brno 2009, dostupné na: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/13747/2009_BP_Pavezka_Vladimir_53779.pdf?sequence=1, on-line, citace [2.5.2013]
- [19] NEČAS P., Tváření vysokou rychlostí deformace, (Bakalářská práce), Vysoké učení technické v Brně, Brno 2012, dostupné na: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor verejne.php?file_id=52592, on-line, citace [2.5.2013]
- [20] BOČEK J., Vliv rychlosti deformace na velikost mezního přetvoření, (Diplomová práce), TU v Liberci, Liberec 2008
- [21] BUCHAR J., BÍLEK Z., Chování kovových materiálů při vysokých rychlostech deformace. Studie ČSAV, Praha 1984
- [22] Oddělení povrchového inženýrství, dostupné na: http://www.ateam.zcu.cz/staticke_zkouseni_cviceni.pdf, on-line, citace [2.5.2013]
- [23] Společnost ALFUN, dostupné na: <http://www.alfun.cz/sortiment/ocel/ocelove-plechy-a-pasy-valcovane-za-studena-elektro>, on-line, citace [2.5.2013]
- [24] Webové stránky výrobce INSTRON,
dostupné na: <http://www.instron.com/>, on-line, citace [2.5.2013]



7. SEZNAM PŘÍLOH

1. Materiálový list tažné oceli DC05 ZE 50/50 BPO
2. Statická zkouška tahem – protokol
3. Zkouška vypínáním – protokol 50 J
4. Zkouška vypínáním – protokol 100 J
5. Zkouška vypínáním – protokol 200 J
6. Zkouška vypínáním – protokol 300 J
7. Zkouška vypínáním – protokol 350 J



Příloha č. 1

WNr.
(číslo materiálu)
1.0312

Jakostní ocel

OCEL
Kurzname (značka)
FeP05/DC05/St15

Chemické složení [hm. %]¹⁾

C	Mn	P	S
max 0,06	max 0,35	max 0,025	max 0,025

Normy DIN

DIN EN 10130-91 – ploché výrobky válcované za studena z hlubokotažných ocelí k tváření za studena
DIN EN 10152-93 – elektrolyticky pozinkované ploché výrobky z ocelí válcovaných za studena

Mechanické vlastnosti⁶⁾

Rozměr t [mm]	–
Stav	převálcovaný za studena
Mez kluzu R _e nebo R _p 0,2 [MPa] max ^{2) 7)}	180
Mez pevnosti R _m [MPa]	270–330
Tažnost A ₈₀ [%] min ³⁾	40
Kontrakce Z [%]	–
Nárazová práce [J]	–
Tvrdost HB	–
Součinitel normálové anizotropie r ₉₀ min ⁴⁾ 5)	1, 9
Exponent deformačního zpevnění min ⁴⁾	0,200

Fyzikální vlastnosti

Hustota ρ [kg . m ⁻³]	7 850
-----------------------------------	-------

Technologické údaje

SVAŘITELNOST
vhodná ke svařování běžnými postupy; při objednávání je vhodné uvádět postup svařování, při předpokládaném svařování plamenem je tento údaj nutný

Použití

Pro tváření za studena, vhodná k nanášení povlaků žárovým pokovováním, elektrolyticky a k nanášení organických a jiných povlaků.

Ostatní vlastnosti

Způsob deoxidace - plně uhlidněná
Jakost povrchu
A - vady, jako póry, malé rýhy, malé výstupky, drobná poškrábání a slabá zabarvení, jsou dovoleny, pokud neomezuji vhodnost ke tváření a přilnavost povrchových povlaků.
B - lepší strana musí být pokud možno bez vad, aby nebyl zhoršen jednotný vzhled kvality lakování nebo elektrolyticky naneseného povlaku, druhá strana musí odpovídat minimálně požadavkům pro jakost povrchu A.



Příloha č. 1

Provedení povrchu a střední hodnota drsnosti.					
Provedení povrchu		Označení		Střední hodnota drsnosti R _a [μm]	
Zvlášť hladký		b		≤ 0,4	
Hladký		g		≤ 0,9	
Matný		m		> 0,6 ≤ 1,9	
Drsný		r		> 1,6	
Porovnání se zahraničními materiály					
ISO		EURO		Česká republika	
–	–	FeP 05	EN 10130-91	FeP 05	ČSN EN 10130-91
Francie		Velká Británie		Rusko	
FeP 05	NF EN 10130-91	ICS FeP 05	BS 1449/1-91 BS EN 10130-91	–	–
USA		Japonsko		Kanada	
–	–	–	–	–	–
Itálie		Rakousko		Švédsko	
FeP 05	UNI EN 10130-91	FeP 05	ÖNORM EN 10130-91	FeP 05	SS EN 10130-91
Polsko		Maďarsko		Norsko	
–	–	–	–	FeP 05	NS EN 10130-91
Finsko		Švýcarsko		Španělsko	
FeP 05	SFS EN 10130-91	FeP 05	EN 10130-91	DC 05 FeP 05	UNE 36086-91 UNE EN 10130-91
–		Belgie		–	
–	–	FeP 05	NBN EN 10130-91	–	–
Poznámky					
1) může být dodávána jako legovaná (např. B nebo Ti), pokud při objednávání nebylo dohodnuto jinak					
2) pro konstrukční účely se může počítat s min hodnotou meze kluzu 140 MPa					
3) u tlouštěk do 0,5 mm se dovoluje min hodnota tažnosti o 4% nižší, u tlouštěk nad 0,5 mm do 0,7 mm se dovoluje min hodnota tažnosti o 2% nižší					
4) hodnoty platí jen pro tloušťky 0,5 mm a více					
5) pro tloušťky nad 2 mm se hodnota r ₉₀ snižuje o 0,2					
6) lhůta záruk mechanických vlastností je 6 měsíců, doba bez vzniku deformačních čar 6 měsíců					
7) u tlouštěk nad 0,5 do 0,7 mm se dovoluje překročení max hodnoty meze kluzu o 20 MPa, u tlouštěk do 0,5 mm o 40 MPa					



Příloha č. 2

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

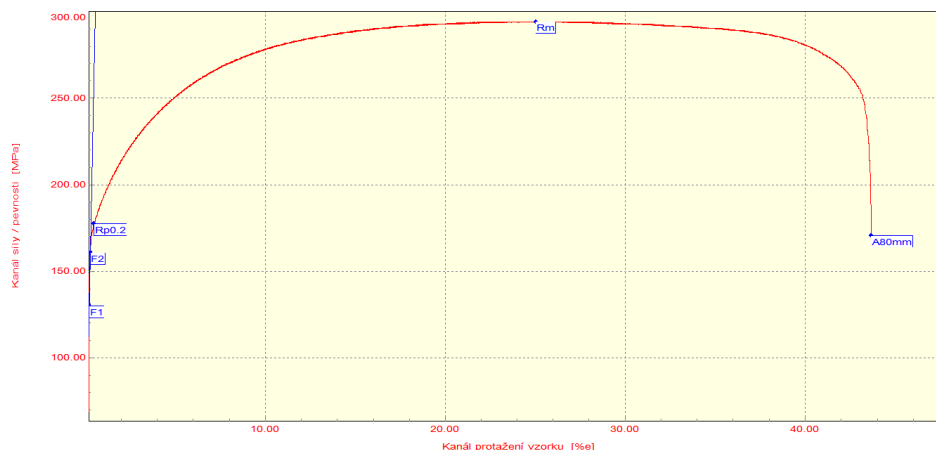
EN ISO 6892-1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DC 05 ZE 50/50 BPO
Norma: : EN 10152
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Rozměr vzorku: : 0.8 x 20.15 [mm]
Vypracoval: : Daniel Slavík
Datum zkoušky: : 17.4.2013
Směr odebrání vzorku : 0°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A80mm %
1	179.9	297.9	42.9
2	176.2	290.6	43.9
3	179.3	297.9	44.6
4	176.2	290.6	43.9
5	177.6	294.2	43.4

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	177.4	294.3	43.7
Směrodatná odchylka	2.2	3.6	0.6



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



Příloha č. 3



Impact test - Vypínání

Impact Energy: 50 J
Impact Velocity: 4,66 m/s



01

	Peak Velocity	Peak Force	Peak Energy	Peak Time
	m/s	N	J	ms
Avg	1.79	7354	41.85	13.52

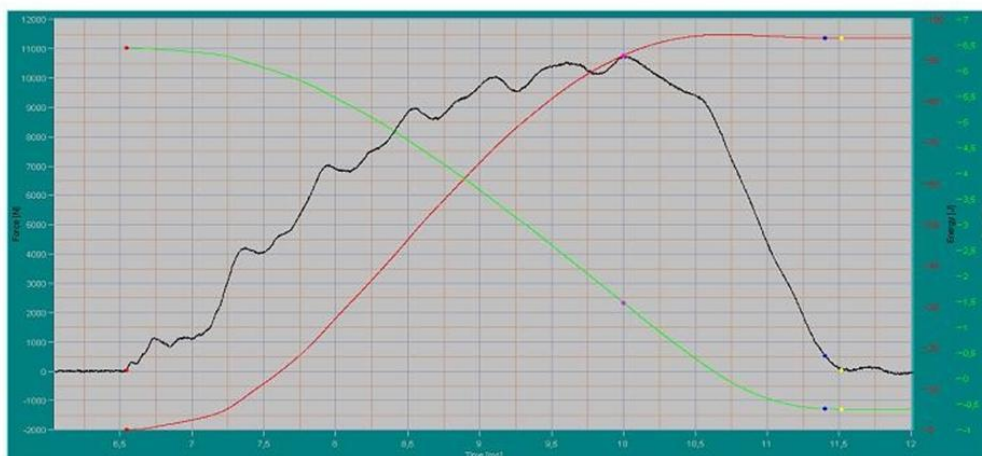


Příloha č. 4



Impact test - Vypínání

Impact Energy: 100 J
Impact Velocity: 6,59 m/s



01

	Peak Velocity	Peak Force	Peak Energy	Peak Time
	m/s	N	J	ms
Avg	1.47	10743	91.21	10.00



Příloha č. 5



Impact test - Vypínání

Impact Energy: 200 J
Impact Velocity: 9,31 m/s



01

	Peak Velocity	Peak Force	Peak Energy	Peak Time
	m/s	N	J	ms
Avg	2.12	15575	190.22	8.01



Příloha č. 6



Impact test - Vypínání

Impact Energy: 300 J
Impact Velocity: 11,42 m/s



01

	Peak Velocity	Peak Force	Peak Energy	Peak Time
	m/s	N	J	ms
Avg	3.23	17751	278.52	7.10

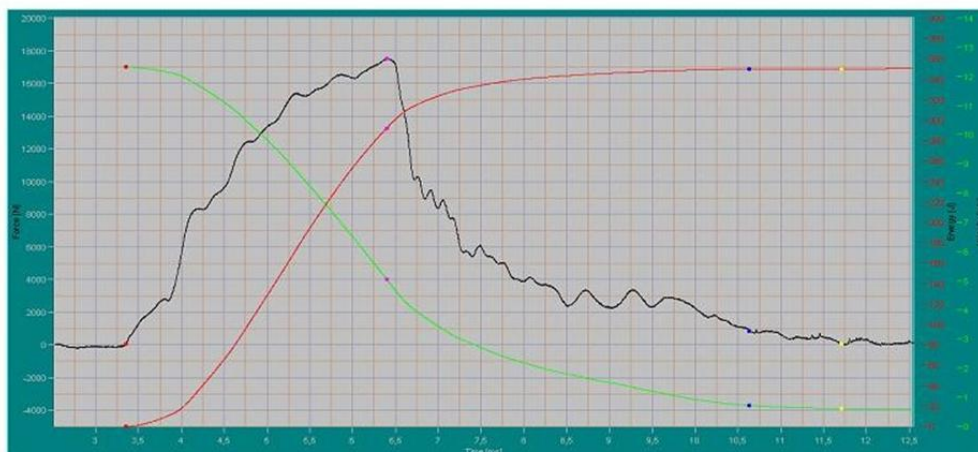


Příloha č. 7



Impact test - Vypínání

Impact Energy: 350 J
Impact Velocity: 12,33 m/s



01

	Peak Velocity	Peak Force	Peak Energy	Peak Time
	m/s	N	J	ms
Avg	5.05	17 868	292.00	6.39



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 24. května 2013

Podpis:



Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical university of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 24. května 2013

Signature: